

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE FIABILIDAD PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE LUBRICANTES Y DIFERIDAS EN UNIDADES DE BOMBEO CON CAJAS REDUCTORAS LUFKIN 640 EN SERVICIO PARA LA PRODUCCIÓN EN LOS CAMPOS LISAMA, NUTRIA, LLANITO, CARDALES, GALA Y GALAN DE LA GERENCIA DE OPERACIÓN Y DESARROLLO DE MARES (GMA), ECOPETROL S.A.

JAVIER LUCINIO LEÓN BELTRÁN
JORGE ISAAC VALOYES ARMIJO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICÁ
ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2020

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE FIABILIDAD PARA LA REDUCCIÓN DE
CONSUMO DE LUBRICANTES Y DIFERIDAS EN UNIDADES DE BOMBEO CON
CAJAS REDUCTORAS LUFKIN 640 EN SERVICIO PARA LA PRODUCCIÓN EN
LOS CAMPOS LISAMA, NUTRIA, LLANITO, CARDALES, GALA Y GALAN DE LA
GERENCIA DE OPERACIÓN Y DESARROLLO DE MARES (GMA), ECOPETROL
S.A.

JAVIER LUCINIO LEÓN BELTRÁN
JORGE ISAAC VALOYES ARMIJO

Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director: César Iván Noriega Jaimes
Especialista en Mantenimiento y Logística EMAVI

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICÁ
ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2020

AGRADECIMIENTO

Agradecer primero a Dios y la Virgen por permitirnos realizar este trabajo de investigación, también agradecer a todas las personas del área de Unidades de Bombeo directas (ECOPETROL), contratadas (MASA) y del área de mantenimiento (INGENIERIA) que nos colaboraron con información, manuales, acompañamientos en las actividades y disposición para poder realizar la monografía.

Agradecer a nuestro director de monografía Cesar Noriega por el apoyo, orientación en el trabajo y la investigación, agradecer a todos nuestros docentes de la especialización por el aporte de conocimientos, experiencias y solución a inquietudes y dudas en el aprendizaje.

A nuestras familias por la comprensión de no brindarles tiempo y dedicación para compartir con ellos por estar en este plan de investigación, agradecer a la empresa ECOPETROL por cedernos el tiempo para poder cumplir con el trabajo.

Gracias a todos.

JORGE ISAAC VALOYES ARMIJO
JAVIER LUCINIO LEON BELTRAN

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. MARCO REFERENCIAL	21
4.1 MARCO TEORICO	21
4.1.1 Hitos importantes en la historia de la actual gerencia de mares. Entendiendo la evolución del campo.	22
4.2 MARCO CONCEPTUAL	24
4.3 MARCO LEGAL	25
5. DISEÑO METODOLÓGICO	28
5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CAMPOS LA LISAMA, NUTRIA, TESORO, LLANITO, GALA Y GALÁN, PERTENECIENTES A LA GERENCIA DE MARES	28
5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y ESTRATEGIA A DESARROLLAR	30
5.2.1 Desarrollo.	34
5.2.2 Generalidades del mantenimiento centrado en confiabilidad (IMC).....	35
5.3 FALLAS FUNCIONALES O ESTADOS DE FALLA	37
5.3.1 Análisis diagramas por modo de Pareto.	37
5.3.2 Análisis de modos de falla y efectos.	38

5.4 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO.	39
5.4.1 Historia del Bombeo Mecánico.	40
5.4.2 Funcionamiento.	42
5.4.3 Aspectos generales de la caja reductora de engranes.	43
5.4.4 Lubricante en servicio.	46
5.4.5 Suscripción de los eventos y reporte de acontecimientos.	48
5.4.6 Reporte preliminar de fallos y análisis estadístico de los reportes de análisis.	48
5.4.7 Muestras de lubricantes tomadas a las cajas reductoras en estudio.	51
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.	55
6.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA DE ANALISIS DE CAUSA RAIZ (RCA).	55
6.1.1 Análisis de la información recolectada preliminarmente en campo para la aplicación de la metodología RCA.	55
6.1.2 Análisis de históricos de muestreos de cajas reductoras de los pozos en estudio.	56
6.2 ANALISIS DE PARETO.	69
6.2.1 Caracterización de las causas de intervención de las cajas reductoras ...	70
6.2.2 Distribución de las fallas.	75
6.2.3 Distribución de Pareto (diagrama).	76
6.2.4 <i>Comentarios.</i>	76
6.3 ANALISIS DE CAUSA RAIZ.	77
6.3.1 Construcción de un árbol lógico de falla.	77
6.3.1.1 Secuencia de pasos y procedimiento.	77
6.3.1.2 Los métodos de verificación pueden incluir. Observación Visual:	79
6.3.1.3 Validación y al árbol lógico de falla.	81

6.3.1.4	Mantenimiento no conforme a la necesidad de la unidad.....	81
6.4	VALORES DE HUMEDAD ELEVADOS Y CONCENTRACION DE HUMEDAD EN LA UNIDAD.....	82
6.4.1	No se cuenta con un claro estudio de repuestos, min y max en bodega de materiales.. ..	83
6.5	MODOS DE FALLA.....	83
6.6	ANALISIS DE FACTOR COSTO BENEFICIO EN LA IMPLEMENTACION DE ESTAS ACCIONES.	86
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
	BIBLIOGRAFIA.....	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Primer pozo en producción de Colombia, pozo infantas Barrancabermeja Santander.	22
Figura 2. Diagrama de mantenimiento SAP Modulo PM.	25
Figura 3. Distribución política de los campos de producción asociados a la gerencia de Mares.	28
Figura 4. Ubicación de los campos de producción de la Gerencia de Mares.	29
Figura 5. Ubicación de los campos de producción de la Gerencia de Mares.	30
Figura 6. Análisis de modos de fallas y efectos.	38
Figura 7. Causas y el efecto de modo de fallas.	39
Figura 8. Unidades con convencionales.	41
Figura 9. Unidad de bombeo.	42
Figura 10. Unidad de bombeo convencional.	43
Figura 11. Gráfico de partes externas caja reductora 640D.	43
Figura 12. Gráficos despiece componente interno unidad 640D.	45
Figura 13. Regulación de selección lubricantes por el fabricante.	46
Figura 14. Características técnicas lubricantes en servicio.	47
Figura 15. Actividad de lubricante en unidad Mark II.	49
Figura 16. Hallazgo de herrumbre dentro de la casa reductora.	49
Figura 17. Evidencia del tapón de varilla e inspección de nivel con sello y hermeticidad.	51
Figura 18. Características lubricantes original.	51
Figura 19. Muestras de lubricantes Tomadas a día de su cambio.	52
Figura 20. Muestra de lubricantes tomadas en fase emulsificador.	53
Figura 21. Muestras de lubricantes tomadas en fase libre.	53
Figura 22. Modelo de reporte de análisis de lubricantes.	56
Figura 23. Paso de análisis en resultados en resultados de lubricantes.	58

Figura 24. Diagrama de Pareto.	69
Figura 25. Distribución de Pareto.	76
Figura 26. Instructivo para el desarrollo de causas raíz.	78
Figura 27. Árbol lógico de fallas.	80
Figura 28. Procedimiento para cambio de lubricante.	81
Figura 29. Grafico despiece componentes internos unidad 640D.	82

LISTA TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Potenciales pozos producción a evaluar.	31
Tabla 2. Recomendaciones de intervención de cambio de lubricante.	33
Tabla 3. Caracterización de las fallas presentadas por humedad .	70
Tabla 4. Caracterización de las fallas presentadas por humedad.	71
Tabla 5. Caracterización de fallas por elevada tasa de desgaste de cobre.	73
Tabla 6. Caracterización de fallas por elevada tasa de desgaste de plomo.	73
Tabla 7. Caracterización de fallas por elevada presencia de contaminante.	74
Tabla 8. Matriz de acciones ante resultados del análisis del lubricante.	84
Tabla 9. Matriz de acciones ante resultados anormales del análisis del lubricante.	85
Tabla 10. Costos promedio normalización por cambio de lubricante.	80
Tabla 11. Costos promedio normalización de implementar técnicas proactivas.	80

LISTA GRAFICOS

	Pág.
Grafica 1. Relacion características salud lubricantes en muestras.	60
Grafica 2. Relación de desgaste metales blandos con contaminante silicio.	62
Grafica 3. Relación desgaste Hierro con contaminante de silicio.	63
Grafica 4. Relación de silicio con la acidez del lubricante.	64
Grafica 5. Relación de la viscosidad Vs elemento de desgaste	66
Grafica 6. Relación de la presencia de humedad Vs elementos de desgaste en hierro.	67
Grafica 7. Relación de la presencia de humedal Vs elemento de desgaste en metales blandos.	68
Grafica 8. Distribución de los contaminantes en los lubricantes de las cajas reductoras.	75

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE FIABILIDAD PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE LUBRICANTES Y DIFERIDAS EN UNIDADES DE BOMBEO CON CAJAS REDUCTORAS LUFKIN 640 EN SERVICIO PARA LA PRODUCCIÓN EN LOS CAMPOS LISAMA, NUTRIA, LLANITO, CARDALES, GALA Y GALAN DE LA GERENCIA DE OPERACIÓN Y DESARROLLO DE MARES (GMA), ECOPETROL S.A.*

AUTORES: JORGE ISAAC VALOYES ARMIJO
JAVIER LUCINIO LEÓN BELTRÁN**

PALABRAS CLAVES: rca (root cause analysis), Unidad de Bombeo Mecánico, Caja reductora, Árbol Lógico de Fallas, Diagrama de Pareto, Modos análisis de Fallas

RESUMEN.

La Gerencia de Mares asociada a la Vicepresidencia Regional Central de Ecopetrol S.A. está integrada por los campos de producción geográficamente distribuidos en los municipios de San Vicente de Chucuri: Campo Lizama y Barrancabermeja: Campo Llanito con el soporte de laboratorio de la empresa distribuidora de lubricantes, se identifican y definen las acciones de mantenimientos enfocadas en la normalización de las desviaciones técnicas de los lubricantes en las cajas reductoras.

Estas desviaciones están generando un aumento del consumo de lubricantes, así como la creación de rutinas reactivas de inspección y mantenimiento, las cuales generan una movilización importante de recursos económicos transformados en vehículos, herramientas, equipos, consumibles y horas de mantenimiento técnico y administrativo, que sumada a los lapsos de no producción por las intervenciones hacen que los márgenes de rentabilidad y operatividad sean ajustados.

Con lo anterior, se identifican y definen los pozos con un potencial neto superior a 40 barriles día los cuales son considerados como de mayor criticidad e impacto a la producción, esto, con el objetivo de identificar las fallas más recurrentes y de mayor impacto para así poder realizar su análisis, determinar su causa raíz, definir su modo y origen y dar soluciones y alternativas de mejora.

* Monografía

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director Ingeniero Cesar Iván Noriega Jaimes

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF RELIABILITY TECHNIQUES FOR THE REDUCTION OF LUBRICANTS AND DEFERRED CONSUMPTION IN PUMPING UNITS WITH LUFKIN 640 GEARBOXES IN SERVICE FOR PRODUCTION IN THE FIELDS OF LISAMA, NUTRIA, LLANITO, CARDALES, GALA AND GALA OF THE OPERATION AND DEVELOPMENT MANAGEMENT OF MARES, ECOPETROL S.A. *

AUTHORS: JORGE ISAAC VALOYES ARMIJO

JAVIER LUCINIO LEÓN BELTRÁN**

KEY WORDS: RCA (ROOT CAUSE ANALYSIS), Mechanical Pumping Unit, Gearbox, Logical Failure Tree, Pareto Diagram. Failure modes and analysis.

SUMMARY.

The Management of Mares associated to the Central Regional Vice Presidency of Ecopetrol S.A. is integrated by the geographically distributed production fields in the municipalities of San Vicente de Chicer: Field Lizama and Barrancabermeja: Field Llanito with the laboratory support of the lubricant distribution company, maintenance actions focused on the normalization of the technical deviations of the lubricants in the gearboxes are identified and defined.

These deviations are generating an increase in lubricant consumption, as well as the creation of reactive inspection and maintenance routines, which generate a significant mobilization of economic resources transformed into vehicles, tools, equipment, consumables and hours of technical and administrative maintenance, which added to the periods of non-production by the interventions makes the margins of profitability and operability adjusted.

In accordance with the above, wells with a net potential higher than 40 barrels per day are identified and defined, which are considered as having the greatest criticality and impact on production. This is done with the objective of identifying the most recurrent faults with the greatest impact in order to carry out their analysis, determine their root cause, define their mode and origin, and provide solutions and alternatives for improvement.

* Monograph

** Faculty of Engineering Physics-Mechanical, Maintenance Management Specialization.

Director: Engineer Cesar Iván Noriega Jaimes

INTRODUCCIÓN

El trabajo fue realizado en los campos de Lisama, Cardales, Gala, Galán, Llanito y Nutria de la Gerencia de la Vicepresidencia Regional Central de Ecopetrol S.A. Tomamos en cuenta 90 pozos que tienen unidades de bombeo con cajas reductoras modelo 640.

Para la investigación tomamos 30 pozos que fueron escogidos por criticidad de producción neta superior a los 40 barriles día, analizamos los resultados de las muestras de aceite entregadas por el soporte del distribuidor de lubricantes desde el año 2011 hasta el mes de septiembre del año 2019.

Aplicando la técnica de Pareto en los resultados de las muestras de los lubricantes identificamos los contaminantes más influyentes; realizamos un RCA para identificar las fallas y verificamos los resultados de las tendencias concluyendo con un árbol lógico de fallas las causas raíces.

Adicional como parte del proceso de investigación se realizaron visitas y acompañamientos en campo a la ejecución de actividades programadas y no programadas verificando técnicas aplicadas en las intervenciones de los cambios de aceite, mantenimientos, lubricaciones y toma de muestras de lubricante.

Todo lo realizado encaminado en identificar los malos actores que generan aumento en los costos de mantenimiento y reducción de los márgenes de rentabilidad del negocio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Gerencia de Mares asociada a la Vicepresidencia Regional Central está integrada por los campos de producción geográficamente distribuidos en los municipios de: Campo Lisama, Tesoro y Nutria en el municipio de san Vicente Chucuri. En los campos anterior mente nombrados, contamos con sistemas de extracción de hidrocarburos basado en unidades mecánicas de bombeo marca Lufkin con caja reductora 640, la cual es la versión más utilizada y la de mayor referencia, teniendo presente que esta unidad se utiliza en la extracción de hidrocarburos en pozos de potencial “relevante” y que aportan en gran medida el grueso diario de producción de la Gerencia de Producción para el desarrollo de Mares (GMA).

Por otra parte, en la actualidad, contamos con el servicio de especialista en análisis de lubricante quien, junto con el soporte de laboratorio de la empresa distribuidora de lubricantes, identifican y definen las acciones de mantenimientos enfocadas en la normalización de las desviaciones técnicas de los lubricantes en las cajas reductoras.

Estas desviaciones están generando un aumento del consumo de lubricantes, así como la creación de rutinas reactivas de inspección y mantenimiento, las cuales generan una movilización importante de recursos económicos transformados en vehículos, herramientas, equipos, consumibles y horas de mantenimiento técnico y administrativo, que sumada a los lapsos de no producción por estas intervenciones hacen que los márgenes de rentabilidad y operatividad sean ajustados.

2. JUSTIFICACIÓN

El concepto de globalización o aldea global, se cree que fue definido décadas atrás por el filósofo canadiense Marshall McLuhan,² como una explicación del constante aumento recíproco de la interconectividad humana a escala global, la cual es generada por los medios electrónicos de comunicación. Ahora teniendo presente los actuales avances de comunicación, del manejo de la información y de la “globalización” de los mercados y sus procesos de fabricación y distribución, día a día están haciendo que las brechas o márgenes de rentabilidad sean más ajustados y en consecuencia sean optimizados los recursos de mantenimiento, operación y administración de estos procesos. *“En nuestra experiencia, realizando proyectos de mejora en cientos de empresas en varios países, nos encontramos, sin embargo, con una realidad: La mayor parte del presupuesto en el área de mantenimiento es consumida por actividades de mantenimiento correctivo y preventivo, sobretodo en el primero... Es decir, se gasta ese dinero en corregir averías y fallas que no sólo significan costes por recambios, mano de obra, tiempo extra, etc., sino que, además, tienen implicaciones en la calidad de los productos al mismo tiempo que paralelamente afectan en pérdidas de producción con un mucho mayor impacto en los costes”*.

Por lo anteriormente citado y en nuestra experiencia en la gestión de mantenimiento de estos y otros activos que generan valor a la producción de hidrocarburos, nos vemos en la necesidad de generar los criterios técnicos, basados en los antecedentes de la operación y mantenimiento, para la optimización de la producción con costes bajos y rentabilidad que puedan hacer estable y rentable el negocio.

² PARAMO, José. Tribología Centrada En Confiabilidad. [en línea]. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://predictiva21.com/articulo/tribologia-centrada-en-confiabilidad/>

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Reducir las diferidas de producción de crudo y consumo de lubricantes industriales asociadas a las actividades reactivas de mantenimiento por cambio de lubricante en las cajas reductoras Lufkin 640 incorporadas en las unidades de bombeo mecánico de los pozos productores de los campos Lisama, Nutria y Tesoro de la Gerencia de Operación y Desarrollo de Mares (GMA), ECOPETROL S.A

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar técnicas de análisis estadístico de datos para la recopilación, tabulación y selección de la información emitida en los análisis de lubricantes generados en las cajas reductoras Lufkin 640.
- Ejecutar revisión y recopilación de las acciones de mantenimiento ejecutadas en las cajas reductoras Lufkin 640, reportadas en el módulo de mantenimiento de la plataforma de gestión de mantenimiento SAP, modulo PM.
- Utilizar técnicas de fiabilidad, Pareto, análisis causa raíz y efectos (FMEA), para la detección de fallas, malos actores y causas que mejoren la fiabilidad operativa.
- Determinar factor costo beneficio de las acciones a implementar en el nuevo plan de mantenimiento.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEORICO

Podríamos asumir que el origen de la exploración y explotación petrolera en Colombia nace junto con la concesión de Mares en el municipio de Barrancabermeja Santander, (ver figura 1) enfocándonos que hoy por hoy la visión de producción y escalamiento de la misma se ha mantenido. Eliminando esta salvedad la primera concesión y explotación petrolera se dio para el reconocido el escritor Jorge Isaacs, ya famoso por su obra cumbre María, pero quien también era empresario, recorrió junto a su colega de Lórica, Córdoba, Diego Martínez, los primeros afloramientos de crudo del Sinú, fue el primero en obtener una concesión petrolera, en 1886, que luego vendió en 1894.

A pesar de la política “anti yankie” de los primeros años del siglo 19 asociado e influenciado por la pérdida del departamento de Panamá, Roberto de Mares se asoció con los empresarios americanos Michael Benédum, Joe Trass y George Crawford, quienes habían creado el 20 de mayo de 1916, en Wilmington (Delaware), la icónica Tropical Oil Company (Troco), que con un capital de \$ 50 millones, se asoció con De Mares para explorar en la zona y dos años más tarde, *en 1918, se inicia la producción del pozo con una cifra diaria por flujo natural de 2000 barriles día.*

Figura 1. Primer pozo en producción de Colombia, pozo infantas Barrancabermeja Santander.



Fuente. Libro 60 Años de Ecopetrol (Actualización 22 septiembre 2014).

Con el camino despejado, la mano de Rockefeller se volvió a activar, y a través de la petrolera Standard Oil de Nueva Jersey compró a la Troco y terminó por dominar el sector petrolero nacional durante la primera mitad del siglo XX. En ese periodo tomó vuelo la producción, que arrancó con 0,06 millones de barriles al año y con algunos bajonazos, tocó pico en 1949, cuando se extrajeron 29,7 millones de barriles, según Ecopetrol.

4.1.1 Hitos importantes en la historia de la actual gerencia de mares. Entendiendo la evolución del campo. En 1921 comenzó la operación de la refinería de Barrancabermeja, esta comienza con algunos equipos que fueron importados desde la refinería de Talara en Perú. Es de recordar que este país fue el segundo en la historia del petróleo en perforar pozos, justo 10 años después del inicio de la historia de producción petrolera en los Estados Unidos de Norteamérica.

- 1921 la Andian National Corporation construyó el primer oleoducto para llevar los crudos hasta Mamonal, cerca de Cartagena. Se trataba de una línea de 538 kilómetros y 10 estaciones de bombeo. Entra en servicio en el año de 1926. El oleoducto tuvo capacidad inicial de 30.000 barriles por día, y su contrato estaba pactado a 50 años, con la condición de que terceros lo pudieran usar.
- 1926 se da la primera exportación a Estados Unidos. Fueron 88.172 barriles los que zarparon hacia ese país. Crudo producido desde el campo de Mares.
- 1934. Inicio de la exploración y construcción de los campos petroleros en Puerto Boyacá, Nare, Jazmín; Moriche, Abarco. Por la compañía Texas Petroleum Company.
- 1938. Inicio de la exploración y construcción de los campos petroleros en Yondo por la compañía Holandesa Shell. Es de aclarar que esta concesión fue adquirida y otorgada inicialmente a la empresa “Compañía de Petróleo El Cóndor”, quien vende a Shell.
- 1951. Posterior a un largo litigio por definir la fecha final de reversión de la concesión de Mares, esta revierte al estado colombiano, el cabeza del señor Presidente Laureano Gómez, en una política de nacionalismo, confía en la capacidad de los trabajadores colombianos y su experiencia adquirida años atrás y funda lo que hoy conocemos como Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol.
- 2005. En el mes de septiembre y luego de un proceso de invitación pública de asociación, se realizó la firma del proyecto de producción y recuperación del campo La Cira – Infantas. Antiguos campos de la original concesión de Mares.
- Actualidad. Bajo la dirección de la Vicepresidencia Regional Central, se tienen definidos los campos asociados a las gerencias y su entorno de alcance geográfico. A futuro y con base a los proyectos de exploración y producción, así como el crecimiento en la perforación se pretende la redistribución de las áreas, creación o modificación de nuevas gerencias y la absorción de los campos que revierten de la empresa Mansarovar Energy Ltda a Ecopetrol S.A.}

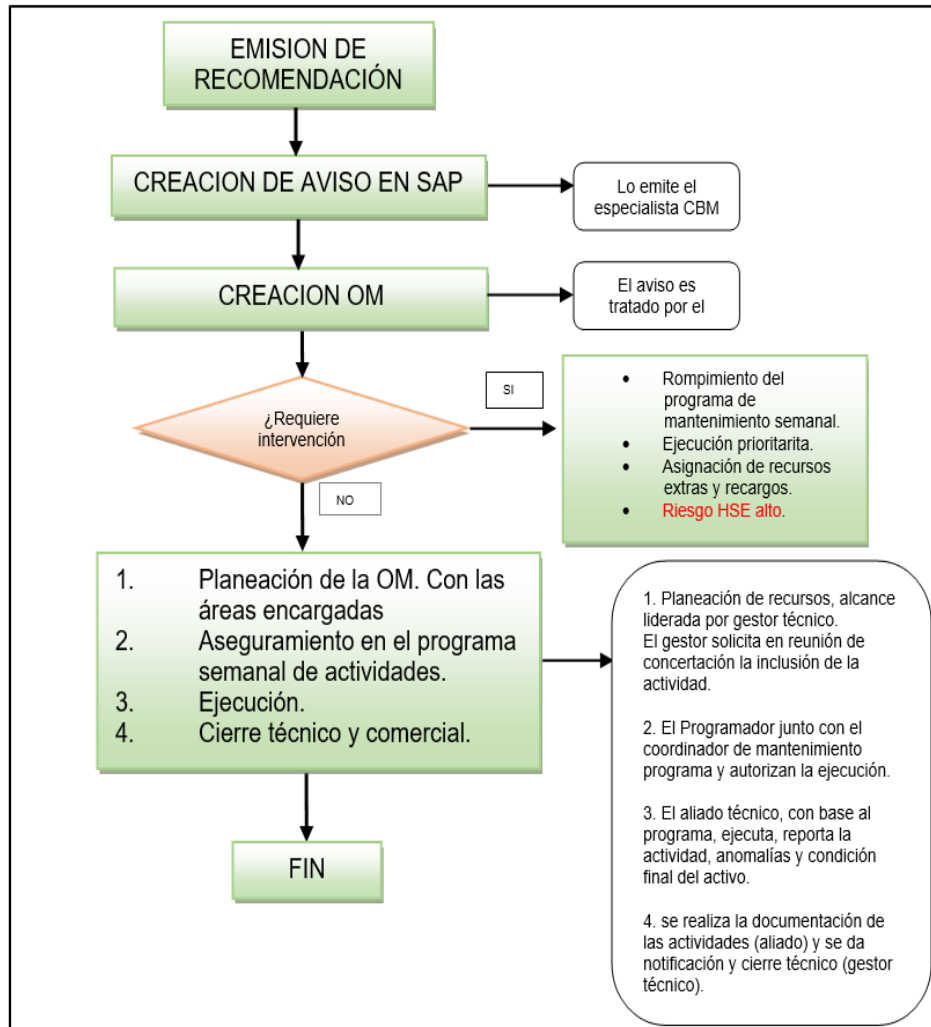
4.2 MARCO CONCEPTUAL

Actualmente, basados en las recomendaciones emitidas por parte del especialista en lubricación y confiabilidad, quien pertenece al equipo técnico de técnicas predictivas asociadas al contrato macro de mantenimiento integral de activos de la Gerencia de Mares (GMA), el cual se encuentra adjudicado a la empresa Mecánicos Asociados S.A.S, emite con base a los análisis, tendencias, conocimiento del entorno (know how) y seguimiento a la matriz de criticidad las acciones de mantenimiento que se enfocan en la inspección, corrección, limpieza y cambio de lubricante del reductor de velocidad.

Posterior a esta recomendación, se inicia la gestión de tarea en la plataforma de mantenimiento SAP modulo PM y sus acciones a los niveles de intervención en la cadena de autorización de la siguiente manera. (Ver figura 2)

Basados en el siguiente esquema, evidenciamos que no se tiene una retroalimentación final con el especialista CBM, en lo relacionado a la evaluación de hallazgos, identificación de malos actores, detección de la causa raíz y eliminación de defectos. Por lo anterior la recurrencia de la falla, afectación de la producción es frecuente.

Figura 2. Diagrama de mantenimiento SAP Modulo PM.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 MARCO LEGAL

En Colombia, la Constitución política del año 1991 y sus reformas establecen la propiedad del gobierno de todos los recursos que son propensos a explotación y a la generación de rentabilidad al país. Por lo anterior se tiene estipulado que el subsuelo es propiedad de la nación y esta procederá conforme a la normatividad y legalidad a realizar las acciones necesarias para su explotación y aprovechamiento en nombre del bienestar del pueblo colombiano.

Estas leyes, decretos y artículos de la Constitución Política Colombiana son:

- **Ley 110 de 1912.** Establece la posibilidad de otorgar concesiones temporales para explotación, pero con la autorización previa de congreso.
- **Ley 120 de 1919.** Define el término hidrocarburos y se estipula que la industria que explota este bien y la construcción de oleoductos son de utilidad pública. Se fijan los primeros impuestos para estas actividades.
- **Ley 37 de 1931.** Determina que el petróleo propiedad de la nación solo podrá explotarse en virtud de contratos que se inicien y perfeccionen de conformidad con esa ley. El contrato de concesión, genera regalías en favor de la nación y la explotación de petróleo genera impuestos.
- **Ley 160 de 1936.** Fija un Nuevo marco normativo para la propiedad particular del petróleo.
- **Ley 18 de 1952.** Establece código de petróleo que reconoce en ciertos términos la propiedad privada del petróleo.
- **Decreto 1056 de 1953.** Reglamentó el contrato de concesión.
- **Ley 10 de 1961.** Establece mejores condiciones para el estado en los contratos, reducción de la fase exploratoria, la aceleración del retorno de la extensión de terreno involucrada, el mejoramiento en la utilización del gas natural y el aumento de la participación del gobierno en la producción.
- **Concesión de mares 1951.** El Estado comenzó su intervención directa en la cadena de producción de petróleo.
- **Ley 20 de 1969.** Establece el principio de propiedad absoluta de la Nación sobre los yacimientos de hidrocarburos, respetando los derechos a favor de terceros.
- **Decreto legislativo 2310 de 1974.** Encargo de manera privativa a ECOPETROL de las actividades de exploración y explotación, las que podría llevar a cabo directamente o con personas naturales o jurídicas nacionales o extranjeras.

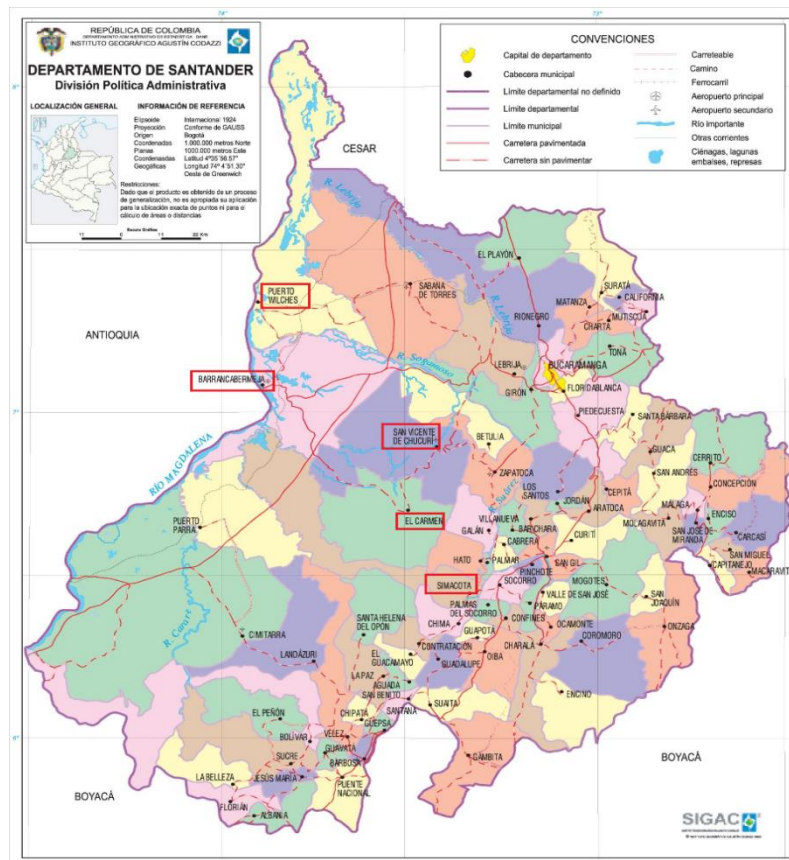
- **Artículo 332 CPC.** El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.
- **Artículo 360 CPC.** La explotación de un recurso natural no renovable causará, a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía, sin perjuicio de cualquier otro derecho o compensación que se pacte. La ley determinará las condiciones para la explotación de los recursos naturales no renovables. Mediante otra ley, a iniciativa del Gobierno, la ley determinará la distribución, objetivos, fines, administración, ejecución, control, el uso eficiente y la destinación de los ingresos provenientes de la explotación de los recursos naturales no renovables precisando las condiciones de participación de sus beneficiarios. Este conjunto de ingresos, asignaciones, órganos, procedimientos y regulaciones constituye el Sistema General de Regalías.
- **Ley 141 de 1994.** Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones.
- **Ley 756 de 2002.** Modificó la ley 141 de 1994 y estableció criterios de distribución y cálculo de regalías para los diversos productos mineros y los hidrocarburos y sus derivados.
- **Ley 1530 de 2012.** Por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías.
- **Decreto 1760 de 2003.** separó las responsabilidades empresariales y regulatorias que hasta ese momento estaban en cabeza de Ecopetrol. Para tal fin se crea la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) entidad que a partir de su entrada en funcionamiento asumió las responsabilidades regulatorias que hasta ese momento tenía Ecopetrol.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CAMPOS LA LISAMA, NUTRIA, TESORO, LLANITO, GALA Y GALÁN, PERTENECIENTES A LA GERENCIA DE MARES

En la actualidad, la Gerencia de Operaciones de Mares, conforma y hace parte de la Vicepresidencia Regional Central de Ecopetrol S.A.; con injerencia en los departamentos Cesar, Antioquia, Santander, Norte de Santander y Boyacá. (Ver figura 3).

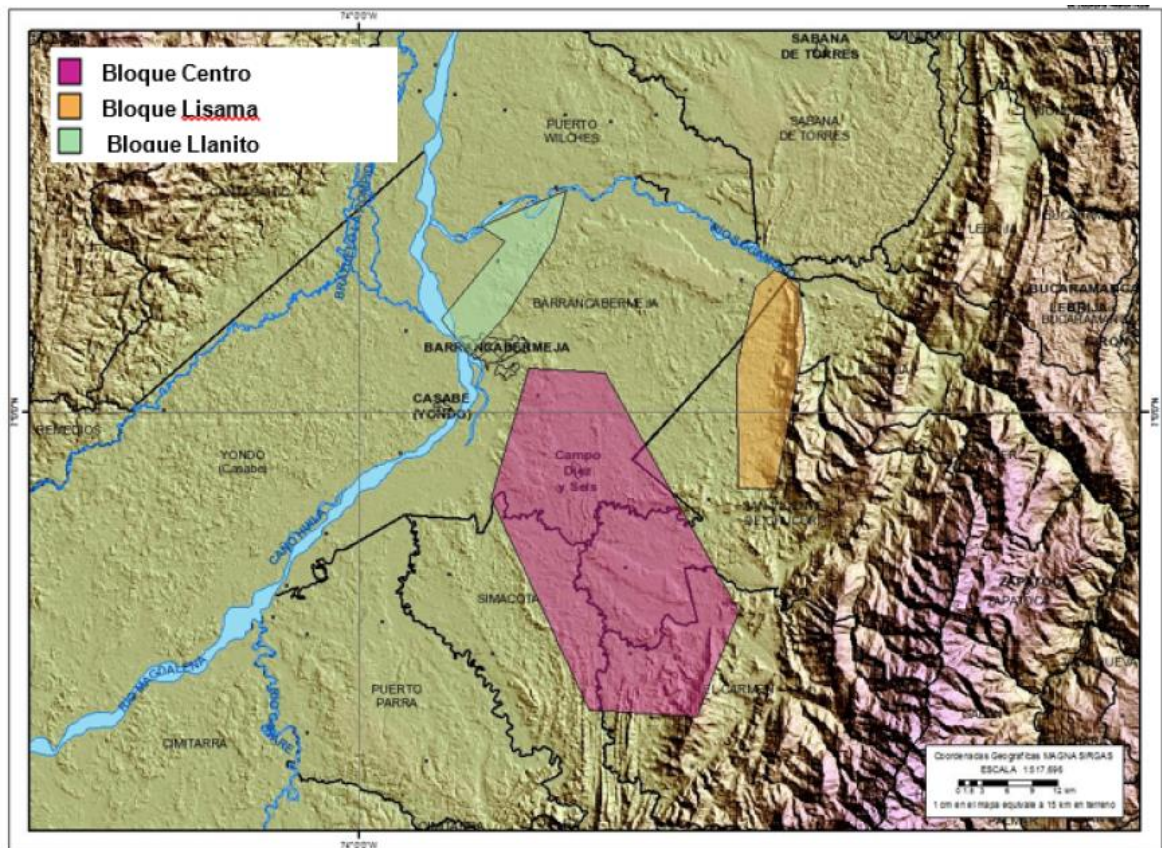
Figura 3. Distribución política de los campos de producción asociados a la gerencia de Mares.



Fuente: Catalogo de mapa de IDEAM (2018).

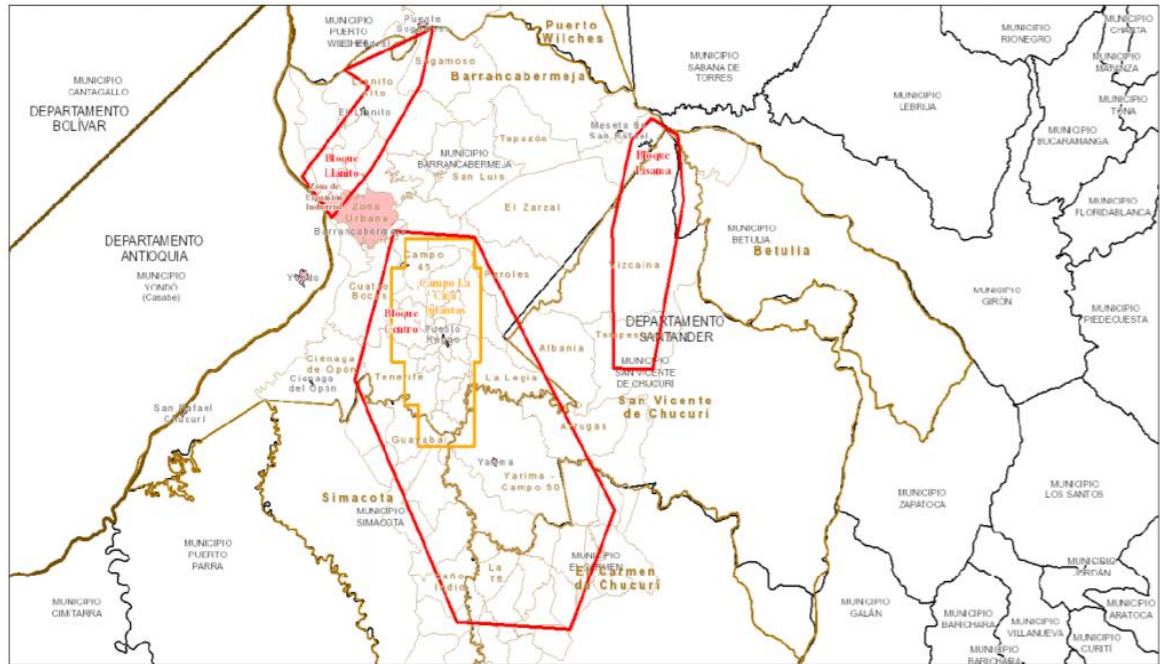
La gerencia de Operaciones de Mares, la componen los campos de producción del Rio, el Centro, Tibú y Provincia (ver figura 4 y 5) Los bloques y sus áreas de influencia se ubican en el departamento de Santander, en jurisdicción de los municipios de Barrancabermeja, San Vicente de Chucurí, Carmen de Chucurí, Betulia, Simacota y Puerto Wilches, abarcan una extensión de 77110.46 ha Bloque Centro, 15812.10 ha Bloque Lisama y 11095.06 ha Bloque Llanito, conformando un polígono cuyos vértices se encuentran en las coordenadas referidas en las siguientes gráficas.

Figura 4. Ubicación de los campos de producción de la Gerencia de Mares.



Fuente. ANLA. AUTO N° 01296. (27 de marzo de 2018).

Figura 5. Ubicación de los campos de producción de la Gerencia de Mares.



Fuente. ANLA. AUTO N° 01296. (27 de marzo de 2018).

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y ESTRATEGIA A DESARROLLAR

Si bien la unidad de bombeo convencional con balancín y varilla succionadora es de tecnología antigua, continúa siendo parte del sistema de extracción artificial más popular utilizado actualmente por varias buenas razones. En nuestros campos de producción, la longevidad y maduración de los mismos, la falta de implementación de métodos de recobro secundario nos enfoca en identificar y neutralizar los malos actores que se pueden llegar a generar con los pozos productores con mayor potencial diario. Teniendo presente lo anterior se definen las siguientes pautas de control.

La Gerencia de mares con fecha a septiembre de 2019 produce cerca de 13.000 barriles equivalentes de crudo.

- Los campos Llanito (Llanito, Cardales, Gala y Galán), así como Lisama (Lisama, Nutria y Tesoro), producen cerca de 6.500 barriles día equivalentes de crudo.

- Pozos críticos con extracción mecánica de superen los 40 barriles día. Se cuentan con pozos de flujo natural o con extracción con equipos electro sumergibles que se descartan por no ser la naturaleza de este proyecto, Con las pautas se logran Identificar 30 pozos a evaluar conforme a la siguiente Tabla.

Tabla 1. Potenciales pozos producción a evaluar. Fecha de actualización septiembre de 2019.

CAMPO	NOMBRE DEL POZO	POTENCIAL NETO CRUDO BARRILES DIA
LISAMA	LISAMA 140	59,88
LISAMA	LISAMA 152	40,00
LISAMA	LISAMA 161	151,86
LISAMA	LISAMA 163	125,90
LISAMA	NUTRIA 15	91,08
LISAMA	NUTRIA 28	39,82
LISAMA	NUTRIA 33	42,14
LISAMA	NUTRIA 35	63,38
LISAMA	NUTRIA 40	41,01
LISAMA	NUTRIA 41	72,01
LISAMA	NUTRIA 65	188,85
LISAMA	NUTRIA 42	106,27
LLANITO	CARDALES 15	73,5
LLANITO	CARDALES 2	71,54
LLANITO	CARDALES 5	45
LLANITO	CARDALES 6	40,15
LLANITO	GALA 16	53,76

LLANITO	GALA 6	40
LLANITO	GALA 8	51
LLANITO	GALAN 124	93
LLANITO	GALAN 15	44
LLANITO	GALAN 1J	53
LLANITO	GALAN 74	40
LLANITO	LLANITO 107	66,96
LLANITO	LLANITO 114	46,56
LLANITO	LLANITO 119	45,03
LLANITO	LLANITO 130	59,16
LLANITO	LLANITO 18	61
LLANITO	LLANITO 84	45,75
LLANITO	LLANITO 99	40,15
PRODUCCION BARRILES DIA		1991,75

Fuente. Ecopetrol S.A/ Producción Gerencia de Mares.

Teniendo presente lo citado, cualquier falla inesperada que nos llegue a generar una actividad de mantenimiento reactivo, genera una gran cantidad de recursos económicos, técnicos y humanos que tomara una importante cantidad de producción para su amortización.

Basados en el anterior esquema, evidenciamos que no se tiene una retroalimentación final con el especialista CBM, en lo relacionado a la evaluación de hallazgos, identificación de malos actores, detección de la causa raíz y eliminación de defectos. Por lo consiguiente la recurrencia de la falla, afectación de la producción es frecuente. Como dato global, para el año 2019 a la fecha de emisión de este documento, se han generado 16 recomendaciones de intervención de cambio de lubricante por no cumplir con los requerimientos mínimos esperados

evidenciada tabla 2, Solo en consumo de lubricante se tienen compras por más de 1000 galones en estas atenciones

Tabla 2. Recomendaciones de intervención de cambio de lubricante.

AVISO	OM	EQUIPO / COMPONENTE
400089910	20302969	LISAMA 161
400089911	20303463	LISAMA 18
400089912	20303924	LISAMA 102
400089913	20303925	TESORO 46
400092170	20308570	LISAMA 151
400092171	20308569	LISAMA 127
400092172	20308568	CARDALES 10
400096452	20320341	LLANITO 1A
400096454	20320343	LISAMA 18
400096456	20320342	GALA 12
400096509	20320344	TESORO 36R
400099789	20326600	GALA 10
400099820	20326579	GALAN 123
400101771	20331393	LLANITO 115
400104034	20340027	CARDALES 1
400103896	20341217	GALA 28

Fuente: Elaboración propia.

Adicional, cada intervención de mantenimiento de estos activos, genera una parada promedio de 6 a 8 horas calendario, tiempo de no producción del pozo el cual, con base a su potencial y el actual costo del barril de crudo, podríamos promediar pérdidas de producción cercanas a los 30.000 USD, costo por diferidas.

5.2.1 Desarrollo. La metodología de desarrollo de este proyecto, se enfoca en la identificación desde el enfoque teórico y de mantenimiento en la reducción al mínimo posible de diferidas por actividades de mantenimiento por seguimiento y evaluación de técnicas predictivas o estrategia.

- Identificación de la necesidad. Con base al planteamiento de los objetivos descritos anteriormente, se identificó la necesidad de aumentar y mantener la producción de crudo, así como la reducción de paradas técnicas por mantenimiento en las unidades mecánicas que sirven a estos pozos productores.

- Recopilación de la información. Se procederá a realizar recopilación, estructuración y síntesis de la información técnica necesaria con base a la siguiente propuesta:

- Recopilación de reportes de lubricantes emitidos por laboratorio.

- Recopilación de reportes de mantenimiento cargados en SAP modulo PM a los activos en estudio.

- Recopilación de trazabilidad de potenciales de producción de los pozos.

- Recopilación de históricos de desplazamientos de las unidades de bombeo por rotación.

- Recopilación de posibles RCA, reportes de fallas o documentación técnica desarrollada en años anteriores a la ejecución de este proyecto.

- Selección de documentos técnicos, manuales, libros de consulta y demás que nos permitan la elaboración de este proyecto.

- Posterior a la recopilación de la información, se procederá a generar el análisis técnico con base se vaya evidenciando en la investigación. Estos análisis se podrán desarrollar de la siguiente forma.

- Tablas dinámicas para la tabulación de los resultados de análisis emitidos por laboratorio.

- Aplicación de la técnica de Pareto para la detección de los recurrentes en las notificaciones por parada y mantenimiento.

- Recopilación, análisis y tabulación de la información de producción asociada a los pozos productores en estudio.
- Elaboración de RCA para la identificación de las causas raíz.
- Identificación de modos de falla más principales y su modo de neutralización.
- Estudio conveniencia y/o oportunidad en la aplicación de las soluciones generadas por los anteriores análisis.
- Modificaciones, normalización y prueba piloto en los activos seleccionados en estudio.
- Reporte de resultados.

Por lo anterior esperamos alcanzar como objetivo principal la detección de causas raíces, así mismo poder controlar y neutralizar estos malos actores, disminuir la diferida generada por estas actividades de mantenimiento.

Adicional evaluaremos las propuestas técnicas en el mercado que puedan existir para la normalización de estos malos actores y consecuentemente su viabilidad financiera en la aplicación de estas tecnologías en nuestro negocio. Con estos enfocado en mejorar la rentabilidad y viabilidad del negocio.

5.2.2 Generalidades del mantenimiento centrado en confiabilidad (IMC). El mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC), o “Reliability-centred Maintenance” (RCM), ha sido desarrollado para la industria de la aviación civil hace más de 30 años. El proceso permite determinar cuáles son las tareas de mantenimiento adecuadas para cualquier activo físico. La norma SAE JA1011 especifica los requerimientos que debe cumplir un proceso para poder ser denominado un proceso RCM.

Según esta norma, las 7 preguntas básicas del proceso RCM son:

- ¿Cuáles son las funciones deseadas para el equipo que se está analizando?
- ¿Cuáles son los estados de falla (fallas funcionales) asociados con estas funciones?

- ¿Cuáles son las posibles causas de cada uno de estos estados de falla?
- ¿Cuáles son los efectos de cada una de estas fallas?
- ¿Cuál es la consecuencia de cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir la falla?
- ¿Qué hacer si no puede encontrarse una tarea predictiva o preventiva?

En su orden, la mayor cantidad de fallas crónicas en las industrias y empresas las cuales fueron llamadas fallas crónicas. Estas a forma práctica son aquellas que suceden más de una vez por la misma razón, generalmente son y suman el 20% de los incidentes o pérdidas de producción, consumiendo cerca del 80% de los recursos macro de mantenimiento.

Entre los beneficios de la implementación y aplicación de estas herramientas se pueden enumerar los siguientes:

- Determina y califica las verdaderas raíces de las fallas.
- Disminuye la repetitividad o tiempo medio entre fallos.
- Reducción de los impactos operacionales.
- Reducción de impactos ambientales.
- Mejora los costos de operación.
- Aumento de los indicadores de fiabilidad, disponibilidad y productividad.
- Reduce el impacto laboral por repetitiva de rutinas del personal técnico de mantenimiento.

POSADA P. J.ANDRES. (2014). Aplicación de la metodología del análisis de causa raíz (rca) para la reducción de fallas en los componentes de subsuelo en los sistemas de bombeo pcp en campo Velásquez. Proyecto de Grado.

Posterior a esta identificación y evaluación de la información, será válida y necesaria la aplicación de técnicas de selección, identificación de causas comunes tal cual se enmarcan seguidamente.

5.3 FALLAS FUNCIONALES O ESTADOS DE FALLA

Las fallas funcionales o estados de falla identifican todos los estados indeseables del sistema. Es claro relacionar los estados de falla con las operaciones funcionales del activo, es decir es la no ejecución de la funcionalidad deseada.³

5.3.1 Análisis diagramas por modo de Pareto. El diagrama de Pareto, también llamado curva cerrada o Distribución A-B-C, es una gráfica para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite asignar un orden de prioridades. El diagrama permite mostrar gráficamente el principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales), es decir, que hay muchos problemas sin importancia frente a unos pocos muy importantes. Mediante la gráfica colocamos los "pocos que son vitales" a la izquierda y los "muchos triviales" a la derecha. El diagrama facilita el estudio de las fallas en las industrias o empresas comerciales, así como fenómenos sociales o naturales psicosomáticos.

Hay que tener en cuenta que tanto la distribución de los efectos como sus posibles causas no es un proceso lineal, sino que el 20% de las causas totales hace que sean originados el 80% de los efectos y rebotes internos del pronosticado. Teniendo presente lo anteriormente descrito, el objetivo en el uso de esta técnica de análisis de información, es con base al global de análisis de resultados de lubricantes, encontrar el grueso de fallas presentes en la proporción descrita. Con esto asegurar el asertividad del ejercicio y su economía.

Existen varias aplicaciones y diseños previos en macros de páginas en tablas de cálculo por las cuales se puede guiar y tomar acciones referentes.

³ Mantenimiento centrado en confiabilidad. [en línea]. Gestopolis. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.gestipolis.com/rcm-mantenimiento-centrado-en-confiabilidad/>

5.3.2 Análisis de modos de falla y efectos. El análisis de modos de fallas y efectos FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) (ver figura 6) es un método utilizado para prevenir fallas y analizar los riesgos de un proceso mediante la identificación de causas y efectos a fin de determinar las acciones que se utilizaran para inhibir las fallas.⁴(Ver figura 6)

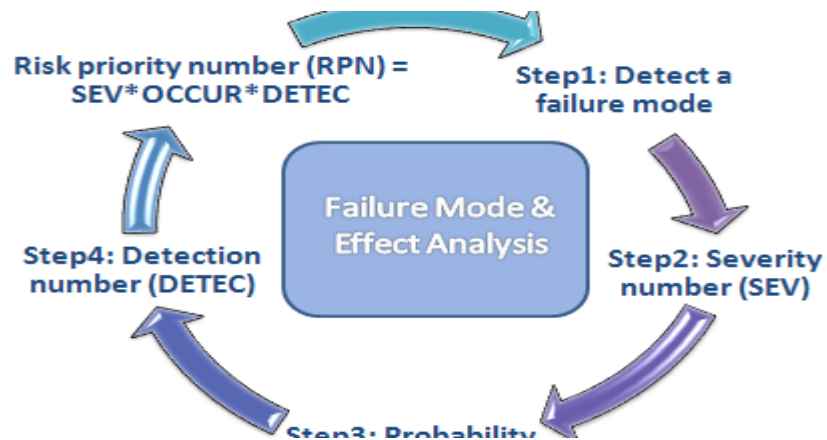
El modo de fallas está relacionado con el hecho de como un proceso puede ser llevado a operar de manera deficiente y está compuesto por tres elementos:

Efecto: es la consecuencia de lo que la falla puede causar al cliente.

Causa: es lo que indica la razón por la que se produjo el error.

Detección es la forma utilizada en el control del proceso para evitar las posibles fallas.

Figura 6. Análisis de modos de fallas y efectos.



Fuente: Innovando.net (19 noviembre 2018).

El **FMEA** es una aproximación estructurada para:

⁴ Análisis de Pareto. [en línea]. Wikipedia. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Pareto

- Identificar las formas en las que el proceso puede fallar para cumplir con los requerimientos críticos del cliente.
- Estimar el riesgo de las causas específicas de esas fallas.
- Evaluar el plan de control actual para prevenir que ocurran fallas.
- Priorizar las acciones que tiene que llevarse a cabo para solucionar algún problema en el proceso.

Figura 7. Causas y el efecto de modo de fallas.



Fuente: innovando.net (19 noviembre 2018).

5.4 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO.

El bombeo mecánico es el método de levantamiento artificial más usado a nivel mundial. Este método consiste en una bomba de subsuelo de acción recíprocante, que se abastece con energía producida a través de una sarta de cabillas. La energía proviene de un motor eléctrico o de combustión interna, el cual moviliza a una unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas ver figura a continuación.

5.4.1 Historia del Bombeo Mecánico. El bombeo mecánico convencional nació prácticamente a la par con la industria petrolera, cuando el Coronel Drake; perforo un pozo que era de su pertenecía ubicado en Pennsylvania aproximadamente en 1859. El coronel Edwin Drake, a pesar de no ser geólogo ni minero, descubre una napa de petróleo a una profundidad de 21 metros utilizando una perforadora mecánica construida para la ocasión por el herrero William Smith, extrayéndolo mediante un rudimentario sistema de bombeo.

En aquella época la perforación se hacía con herramientas de percusión, donde la mecha se suspendía mediante una especie de balancín hecho con madera y se dejaba caer.

Cuando el pozo moría, era más fácil usar el balancín de madera que había quedado en el sitio para operar la bomba de subsuelo; así nació lo que hoy conocemos como BMC, aunque hoy en día no se usan balancines ni cabillas de madera y mucho menos maquinas a vapor, los componentes del método aún se conservan.

El balancín, el cual es el símbolo reconocido a nivel mundial, del BMC; todavía se usa para convertir el movimiento rotatorio del motor en reciprocante y así impulsar la bomba.⁵

En la actualidad, Las unidades de bombeo mecánico se clasifican según su geometría en tres tipos principales:

- **Unidades convencionales**, las cuales tienen el apoyo en el punto medio del balancín. (ver figura 8,9 y 10)

⁵ historia de las unidades de bombeo mecánico. [Consultado: 25 de octubre de 2019]. [Consultado: 25 de junio de 2019]. <http://oil-mail.blogspot.com/2011/05/sistema-de-levantamiento-artificial-por.html>

Figura 8. Unidades con convencionales.

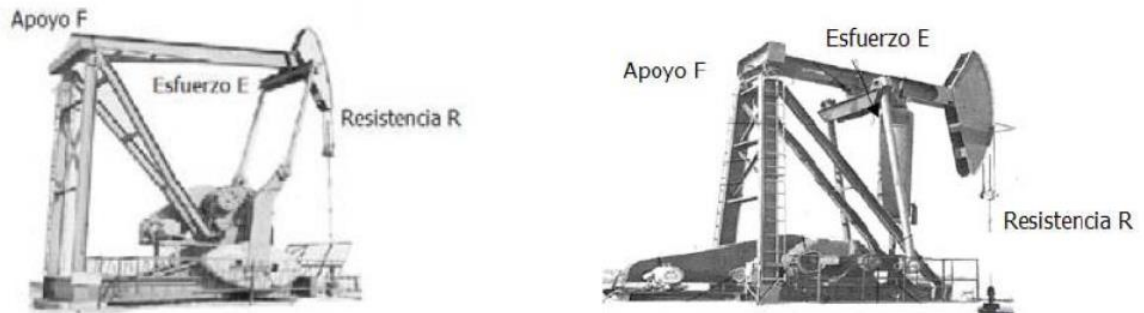


Fuente: Camacho J. Juan, Cervantes B. Rafael. Desarrollo De Un Sistema Experto Para Diseño Y Optimización Operativa Del Bombeo. Proyecto de Grado.

Mecánico

- **Unidades neumáticas**, cuyo punto de apoyo se ubica en el extremo delantero del balancín.
- **Unidades MARK II**, que tienen el apoyo en el extremo trasero del balancín.

Figura 9. Unidad de bombeo.



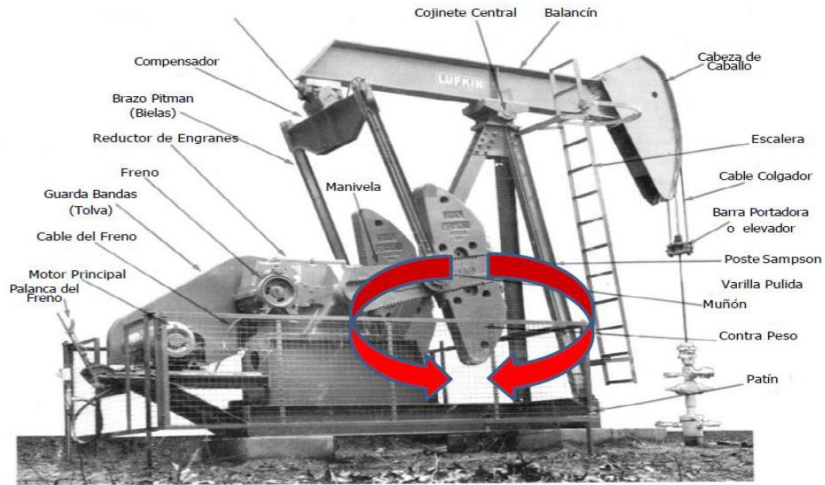
Fuente. Unidad de bombeo convencional. Fuente Camacho J. Juan, Cervantes B. Rafael. Desarrollo De Un Sistema Experto Para Diseño Y Optimización Operativa Del Bombeo. Proyecto de Grado.

5.4.2 Funcionamiento. Las unidades mecánicas de bombeo, convierten movimiento rotacional en movimiento axial, así pueden generar los ciclos de extracción de crudo de la bomba electro sumergible.

Como aspectos importantes tenemos:

- La energía rotacional puede ser generada por motores eléctricos o motores de combustión interna. Estos conectados por un mecanismo de poleas y correas a la caja de engranes de reducción de velocidad.
- El reductor de engranes, tema que nos centra en este libro, ejecuta una reducción de la velocidad de giro entregada al motor para así poder entregar el suficiente torque al balancín para que este pueda mover la varilla y hacer el desplazamiento de la misma.
- La caja reductora contara con un sistema de contra pesas balanceadas que equilibran la carga asociada al peso de varilla, levantamiento de la columna del fluido y accionamiento de la bomba.

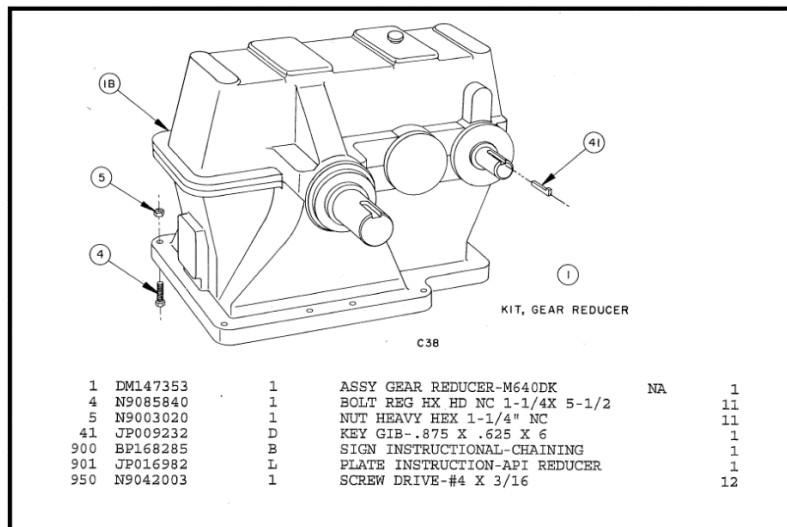
Figura 10. Unidad de bombeo convencional.



Fuente: Camacho J. Juan; Cervantes B. Rafael. Desarrollo De Un Sistema Experto Para Diseño Y Optimización Operativa Del Bombeo. Proyecto de Grado.

5.4.3 Aspectos generales de la caja reductora de engranes. Las unidades mecánicas en cuestión del estudio, cuentan con una caja reductora referencia LUFKIN 640. Estas pueden venir en sus versiones K, V o X, según su punto de soporte.

Figura 11. Gráfico de partes externas caja reductora 640D.



Fuente: LUFKIN. Manual de partes.

En la imagen podemos observar (ver figura 11), que esta caja de engranes reductores de velocidad, diseñada herméticamente para evitar la intervención de agentes externos en el interior de la misma, con esto evitando mejorar la confiabilidad operacional y durabilidad de la misma.

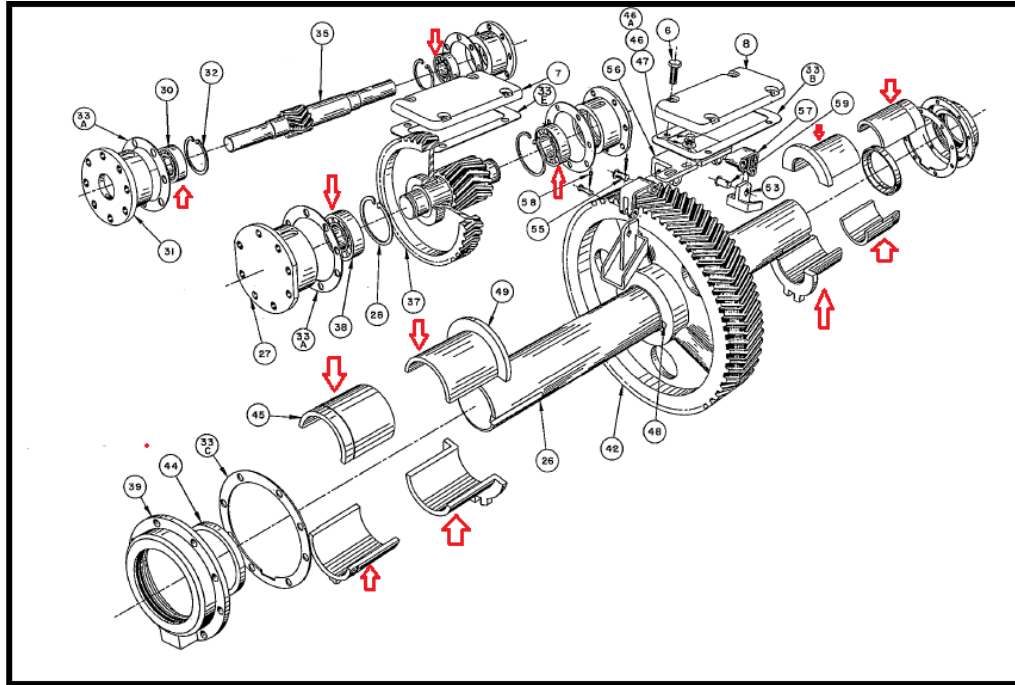
Esta unidad cuenta con un sistema de engrane de alta y baja velocidad, el cual en su relación de transmisión 28.60, multiplica el torque, reduciendo la velocidad recibida de la fuente de potencia.

Adicional está construida y dotada con engranes de referencia “espina de pescado” los cuales tienen las siguientes características.

- Presentan un comportamiento más silencioso que el de los dientes rectos usándolos entre ejes paralelos.
- Poseen una mayor relación de contacto debido al efecto de traslape de los dientes.
- Pueden transmitir mayores cargas a mayores velocidades debido al embonado gradual que poseen.

Esta última es esencial para el tipo de operación debido a las elevadas cargas que transmite y soporta en lo referente al peso de la varilla, columna de crudo en la tubería en proceso de levantamiento y accionamiento de la bomba surgida.

Figura 12. Gráficos despiece componente interno unidad 640D.



Fuente: LUFKIN. Manual de partes.

La energía es recibida por los ejes de alta velocidad (engrane superior e intermedio), los cuales están soportados por juegos de chumaceras de construcción por bolas rígidas. Esta selección se debe a su excelente comportamiento con altas velocidades, transmitidas por la polea y su factor de reducción con la fuente de potencia, así como por su juego axial C3 según SKF, quien provee la referencia del rodamiento, el cual nos permite tener un buen comportamiento en estos desplazamientos. (Ver figura 12)

Posterior y enfocado en el eje y engrane de baja velocidad, estos esta soportados por cojinetes o bujes, los cuales se lubrican con el aceite que contiene la caja reductora. Esta lubricación se da por inmersión de los cojines los cuales están por debajo del nivel del lubricante. Esto nos garantiza que, durante su operación y salvo bajos niveles, se mantendrá una correcta película hidrodinámica en las superficies de contacto.

- EJE. Acero al carbón menor al 2% con adición de cromo y níquel.

- ENGRANES. Acero al carbón menor al 2% con adición de cromo y níquel. En formulación anti oxidante.
- BUJES DE BAJA. Aleación no ferrosa de cobre y plomo.
- CARCASA. Fundición al carbono superior al 4%.

5.4.4 Lubricante en servicio. En la actualidad se cuenta con un suministro de lubricante industrial con las siguientes características. De resaltar las siguientes. (Ver figura 13)

- Grado de viscosidad ISO -460
- Tipo ISO. Lubricante EP. (extrema presión). Cuenta con un paquete completo de aditivo a base de fosforo, el cual se adhiere a las superficies de contacto generando sacrificio en los estados de lubricación limite (arranques en seco).
- Base mineral grado II. (medianamente refinada). Contiene alguna concentración de azufre en su molécula.
- Regular resistencia a la emulsión.

Figura 13. Regulación de selección lubricantes por el fabricante.


REDUCTOR		CAPACIDAD DE ACEITE DEL REDUCTOR	
Para temperaturas de hasta 0°F emplear un lubricante liviano de alta calidad apto para alta presión conforme a norma AGMA N° 5 EP (ISO VG220) (preferentemente tipo fosforoso sulfurado) con agentes antioxidantes y antiespumantes. El punto de fluidez del aceite debe ser como máximo de 5°F. Para temperaturas de hasta -30°F emplear un lubricante liviano de alta calidad apto para alta presión conforme a norma AGMA N° 4 EP (ISO VG150) (preferentemente de tipo fosforoso sulfurado) con agentes antioxidantes y antiespumantes. El punto de fluidez del aceite debe ser de 15°F como máximo.		MODELO	CAPACIDAD
		M 1824D	165 galones
		M 1280D	120 galones
		M 912D	107 galones
		M 640D	70 galones
		M 456D	55 galones
MODELO	CAPACIDAD	MODELO	CAPACIDAD
M 320D	350 galones	M 228D	34 galones
M 160D	22 galones	M 114D	17 galones
M 80D	137 galones		

Fuente. LUFKIN.

El uso de lubricante EP-460 que supera el valor de viscosidad recomendado por la ficha del fabricante se baso en un estudio de los valores de viscosidad minimos requeridos para operación en temperaturas internas superiores al 50 grados Celcius.(ver figura 14)

Figura 14. Características técnicas lubricantes en servicio.

FICHA TÉCNICA



TERPEL ENGRANAJES EP
ISO 68, 100, 150, 220, 320, 460, 680

Lubricante EP para engranajes industriales..

1. DESCRIPCIÓN

Terpel Engranajes EP, lubricantes de alto desempeño desarrollados para cumplir con todas cumplir con todos los requerimientos de lubricación de engranajes industriales, donde las condiciones de altas cargas, película límite y lubricación Elastohidrodinámica EHL son una constante.

Está formulado a partir de bases parafínicas y aditivos de extrema presión del tipo azufre - fósforo, que garantizan la suficiente película en todas aquellas condiciones extremas de operaciones evitando el contacto metal - metal, tecnología no corrosiva a las aleaciones de cobre y bronce

CARACTERÍSTICAS	ISO 68	ISO 100	ISO 150	ISO 220	ISO 320	ISO 460	ISO 680
Viscosidad, cSt a 40, °C, ASTM D - 445	68±6.8	100±10	150±15	220±22	320±32	460±46	680±68
Índice de viscosidad, ASTM D - 2270, mínimo.	90	90	90	90	90	90	90
Punto de inflamación, °C, ASTM D - 92, mínimo.	200	210	220	220	230	230	230
Punto de fluidez, °C, ASTM D - 95.	-15	-15	-10	-10	-10	-5	-5
Corrosión en lámina de cobre, ASTM D-130, 3 horas máximo.	1b	1b	1b	1b	1b	1b	1b
Demulsibilidad, ASTM D-1401, minutos máximo.	30	30	30	30	30	60	60
Espuma, ASTM D 892 tend/estab ml.							
Secuencia I	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0
Secuencia II	20/0	20/0	20/0	20/0	20/0	20/0	20/0
Secuencia III	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0	10/0
Four Ball EP ASTM D-2783							
Load wear Index, Kg. minima	45	45	45	45	45	45	45
Weld Point, Kg. minima	250	250	250	250	250	250	250
FZG wear, load stages passed, min. ASTM D-5182	12	12	12	12	12	12	12
Gravedad específica	0.8811	0.8861	0.8906	0.8934	0.8991	0.9019	0.9142
Número AGMA	2 EP	3 EP	4 EP	5 EP	6 EP	7 EP	8 EP

Fuente: Terpel.

5.4.5 Suscripción de los eventos y reporte de acontecimientos. Teniendo presente el aumento del consumo de lubricante en las cajas reductoras, sus gastos extra de mantenimiento así como el aumento de la diferida producida en general que repercute y genera pérdidas de ingreso de cerca de 30000 dólares solo en la ejecución de las recomendaciones emitidas por el especialista en análisis de lubricantes, se decide ahondar en la falla y por consiguiente en la ejecución de los análisis e investigaciones correspondientes para la normalización y reducción al mínimo de los gastos por mantenimiento y aumento de la rentabilidad del negocio.

5.4.6 Reporte preliminar de fallos y análisis estadístico de los reportes de análisis. Previamente, y durante las rutinas mensuales y trimestrales de inspección y lubricación de los activos por parte de las cuadrillas del frente directo y la contratista, se tiene establecido en una de las operaciones de la orden de mantenimiento lo siguiente. (Ver figura 15)

- Revisión de niveles de lubricante en caja reductora, evaluación primaria de la condición y reposición de niveles. (rutina mensual)
- Toma de muestra de lubricante al reductor y reporte de hallazgos y anomalías.

Evaluando los reportes en el sistema de gestión de mantenimiento SAP, evidenciamos las siguientes anomalías.

- Presencia de viruta y corrosión en tapas de inspección.
- Se drena 1 balde de agua del fondo del Carter del reductor.
- Se evidencia lubricante emulsionado.
- La toma de la muestra con agua, color y olor anormal.

Figura 15. Actividad de lubricante en unidad Mark II.



En la anterior imagen observamos una rutina de inspección, revisión de niveles de lubricante y lubricación de puntos de contacto.

Figura 16. Hallazgo de herrumbre dentro de la casa reductora.



Durante los trabajos de inspección, se logra evidenciar que en las unidades que presentaron acción y recomendación de cambio de lubricante o reposición de niveles presenta una elevada cantidad de herrumbre adherida en las tapas de inspección y en toda la superficie superior de cara interna del reductor. (Ver figura

16). Esta herrumbre se inserta y es desplazado por los engranes del reductor. Los engranes no se observan con pitting o con corrosión.

En la imagen y basados en la inspección del activo, se logra evidenciar los siguientes tipos de corrosión. (Ver figura 17)

- **Picaduras (Pitting).**

La corrosión se produce normalmente por la pérdida localizada de la pasividad del material, provocada por la rotura puntual de la capa pasiva, normalmente asociada al ataque por cloruros, estableciéndose como zona anódica, mientras que el resto de la superficie permanece pasiva actuando como zona catódica, con el consiguiente y marcado efecto superficial.

Si se presenta Pitting, no valen las previsiones de vida media del metal.

- **Corrosión intergranular.**

Es el ataque selectivo del borde de grano, normalmente algo más activo que el resto de la matriz, de ahí que en el ataque de probetas metalográficas sea la zona que normalmente resalta. Su evolución, que produce pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad puede llegar a desgranar literalmente al material.

Figura 17. Evidencia del tapón de varilla e inspección de nivel con sello y hermeticidad.



5.4.7 Muestras de lubricantes tomadas a las cajas reductoras en estudio. El lubricante que se usa en las cajas reductoras, en su estado puro y sin servicio presenta un leve olor a crudo, así como un color ámbar brillante, sin impurezas ni presencia de agua.

Figura 18. Características lubricantes original.



Fuente. Google.

En lo referente a las muestras tomadas y recibidas por parte del personal técnico, se evidencian situaciones anómalas de contaminación con agua en su gran mayoría (ver figura 18). Esta contaminación basada en la interpretación y definición de la misma está catalogada según su nivel de criticidad en las siguientes etapas.

- Disuelta: Se caracteriza por moléculas individuales dispersadas en el aceite, como la humedad en el aire. Las moléculas son tan pequeñas que no se las puede ver.

Figura 19. Muestras de lubricantes Tomadas a día de su cambio.



- Emulsificada: Una vez que se termina de saturar el aceite, el agua queda suspendida en gotas microscópicas en una forma conocida como emulsión. Este nivel de contaminación es visible y se ve el aceite como “lechoso” ver figura 19).

Figura 20. Muestra de lubricantes tomadas en fase emulsificador.



- Libre: Cuando la cantidad de agua sobrepasa de lo que puede mantenerse en forma emulsificada, empieza a acumular una parte de la misma libremente en el fondo del envase, reservorio, o cárter. (ver figura 20)

Figura 21. Muestras de lubricantes tomadas en fase libre.



Las formas más dañinas para el sistema de lubricación son la emulsificada y la libre (ver figura 21). La diferencia en consistencia y compresibilidad entre el aceite y el agua pueden causar una rotura de la película hidrodinámica, permitiendo el contacto entre piezas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA DE ANALISIS DE CAUSA RAIZ (RCA).

6.1.1 Análisis de la información recolectada preliminarmente en campo para la aplicación de la metodología RCA. Como se describió páginas arriba de este documento, se procede a seleccionar 31 pozos productores asociados a los campos Lisama y Llanito, asignados a la Gerencia de Producción de Mares. Estos pozos se seleccionan por su potencial superior a 40 barriles diarios de producción equivalente, por forma de extracción con unidad de bombeo mecánico. Según operaciones y producción estos pozos debido a su potencial suman cerca del 30% de la producción diaria y consecuentemente su nivel de criticidad y de productividad es alto.

La aplicación de técnicas de análisis de causa raíz (RCA) por sus siglas en inglés, es una herramienta potente y muy eficiente para analizar, identificar y neutralizar fallas de tipo crónico o repetitivo.

El aumento de la frecuencia de fallas, paradas de producción genera una alta demanda de los equipos, herramientas y personal adscrito a las cuadrillas de mantenimiento de unidades de bombeo. Generando diferidas que no podrán ser compensadas por los demás pozos debido a su baja producción en comparación a estos, generando un aumento no rentable en los costos de producción por Barril.

Los resultados fueron compartidos con los líderes de cada área quienes, con base a su logística y estrategia, iniciaron los ajustes y correcciones tanto a los procedimientos como al aseguramiento de materiales, migración a nuevos productos e instalación de elementos de control adicional.

6.1.2 Análisis de históricos de muestreos de cajas reductoras de los pozos en estudio. Con base a los históricos generados por el especialista en lubricación de la Gerencia de Mares, se logra la tabulación de más de 5000 muestras generales para la totalidad de los pozos con unidades de bombeo mecánico instaladas en la gerencia desde el año 2012.

De estas 5000 muestras, se extraen 323 resultados asociados a las muestras de los 31 pozos en estudio con el potencial superior a los 40 barriles previamente definido.

A continuación, visualizamos un modelo de reporte de análisis efectuado por laboratorio (ver figura 22)

Figura 22. Modelo de reporte de análisis de lubricantes.

REPORTE DE ANÁLISIS DE LABORATORIO										PN.LO.PR.EQLF.33.COL	Versión: 3	LUBRICANTES MAXTER											
CLIENTE: ECOPETROL S.A. CENTRO										INSPECCION DE CALIDAD	Fecha: 10 de Mayo de 2019	DISTRIBUIDOR: PRIMAXCO											
CIUDAD Y FECHA: Bucaramanga, 24 de Octubre de 2019										ATENRIDO POR: Edinson Lozano													
ESTADO SEMÁFORO: ● ●●●●										REDUCTOR - LUFKIN													
PARTE LUBRICADA: CAJA DE ENGRANAJE										MARCA: LUFKIN	SERIE:	Nº INTERNO:		ESTADO DE LA MUESTRA: CRITICO									
ACEITE LUBRICANTE: ENGRANAJES EP ISO 460										POT:	VOL: 55 gal	PLACA:	GALAN 140		POZO GALAN 140								MODELO: 3200
																							RPM:
Fecha Toma	Muestra Código	Servicio Equipo	Servicio Aceite	¿Cambio Aceite?	Rellenos	Viscosidad a 40°C	TAN mgKOH/g	Caract Humedad	Emulsión Minutos	Sediment Centrifug	Agua Centrifug	Karl Fisher % w/w	RPVOT Minutos	Código Limpieza	Tendencia /Estabilidad SEC I	SEC II	Espuma SEC III	Corrosión Lámina Cu	Oxidación IR	Viscosidad a 100°C	Estado Semáforo		
	PRIMAX	h	h		gal	ASTM D443	ASTM D661	Plancha	ASTM D1401	% Vol	% Vol	ASTM D804	ASTM D2272	ISO 4406	ASTM D82			ASTM D130	ASTM E2412	ASTM D445			
18-abr-18	R18-07271	1	1	No		457,99		Seco													●		
30-sep-18	R18-15108	0	0	No		455,69		Seco													●		
15-mar-19	R19-02863	0	0	No		440,22		Seco													●		
24-mar-19	R19-02943	0	0	No	N	443,10		Seco													●		
25-sep-19	R19-08875	0	0	No	0	454,20		Humedo													●		
LÍMITES						414 - 506	1,5	Seco															
Muestra	CONTENIDO METALICO - EMISION ATÓMICA PARTES POR MILLON (ppm) - ASTM D6595																						
PRIMAX	Al	Cr	Cu	Fe	Pb	Sn	Si	Ni	Ag	B	Na	Mg	Ca	Ba	P	Zn	Mo	Ti	V	K			
R18-07271	1	0	7	153	4	1	4	0	0	2	1	1	15	0	73	5	0	0	0	0			
R18-15108	1	1	5	84	1	0	1	0	0	2	1	0	11	0	21	2	1	1	0	0			
R19-02863	1	1	7	135	1	0	5	0	0	2	1	1	11	0	47	4	0	0	0	0			
R19-02943	1	1	6	121	1	0	3	0	0	2	1	1	12	0	34	4	0	0	0	0			
R19-08875	0	1	6	111	1	0	0	0	0	1	0	0	8	0	34	3	0	0	0	0			
LÍMITES						20	4	80	150	40	30												

Fuente. Primax laboratorio.

El reporte evidenciado se analiza conforme a la técnica SACODE, modelo de inmersión establecido por NORIA.

Para poder facilitar y entender lo que sucede en los activos, se diseñó este proceso sistemático que nos permite trabajar en orden y poder tomar decisiones adecuadas y conforme a lo observado en el sitio de toma de muestra en donde se encuentra el activo, así como por el reporte de análisis emitido por el laboratorio (ver figura 22).

Sus secciones son:

- Salud del lubricante SA.
- Contaminantes CO.
- Desgaste de elementos DE.

Como se observa, el modelo de reporte de análisis de laboratorio se estructura y divide en las secciones de la técnica SACODE. De la siguiente forma.

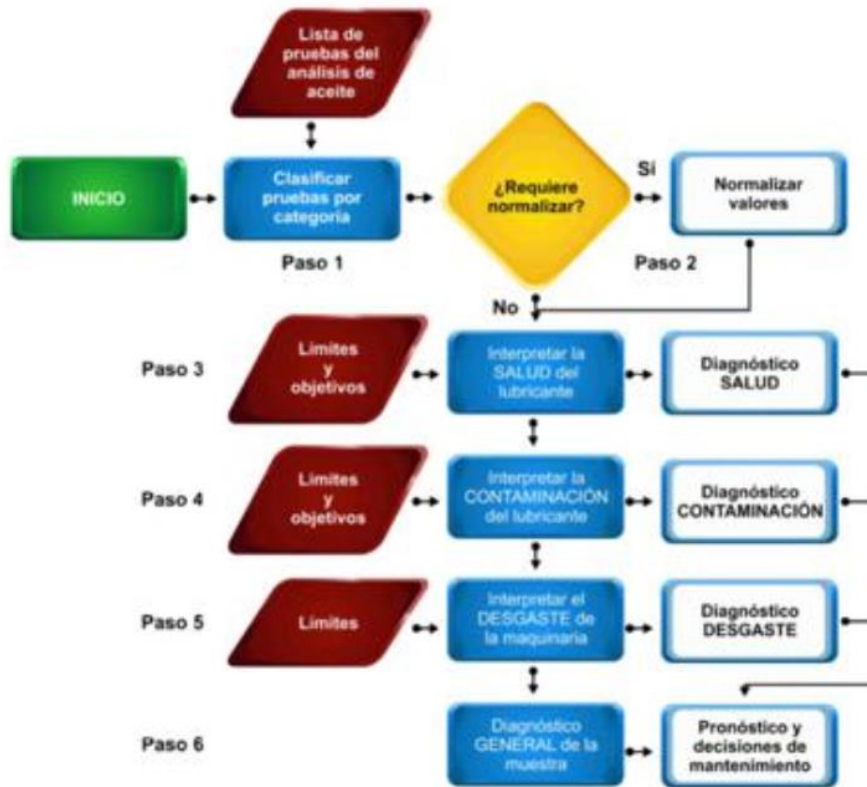
- SALUD.
 - Viscosidad.
 - TAN
 - Paquete aditivo (calcio, bario, fosforo, zinc, molibdeno, titanio). Contenido metálico por análisis de emisión atómica (ASTM D6595)

- CONTAMINACION.
 - Característica de humedad en plancha.
 - Karl Fisher w/w%
 - Silicio, sodio y potasio.

- DESGASTE. Contenido metálico por análisis de emisión atómica (ASTM D6595).
 - Hierro
 - Cobre
 - Plomo
 - Estaño
 - Aluminio
 - Plata
 - Cromo

- Bario.

Figura 23. Paso de análisis en resultados en resultados de lubricantes.



Fuente. TRUJILLO G. (2015). Interpretación de Análisis de Lubricantes. NORIA

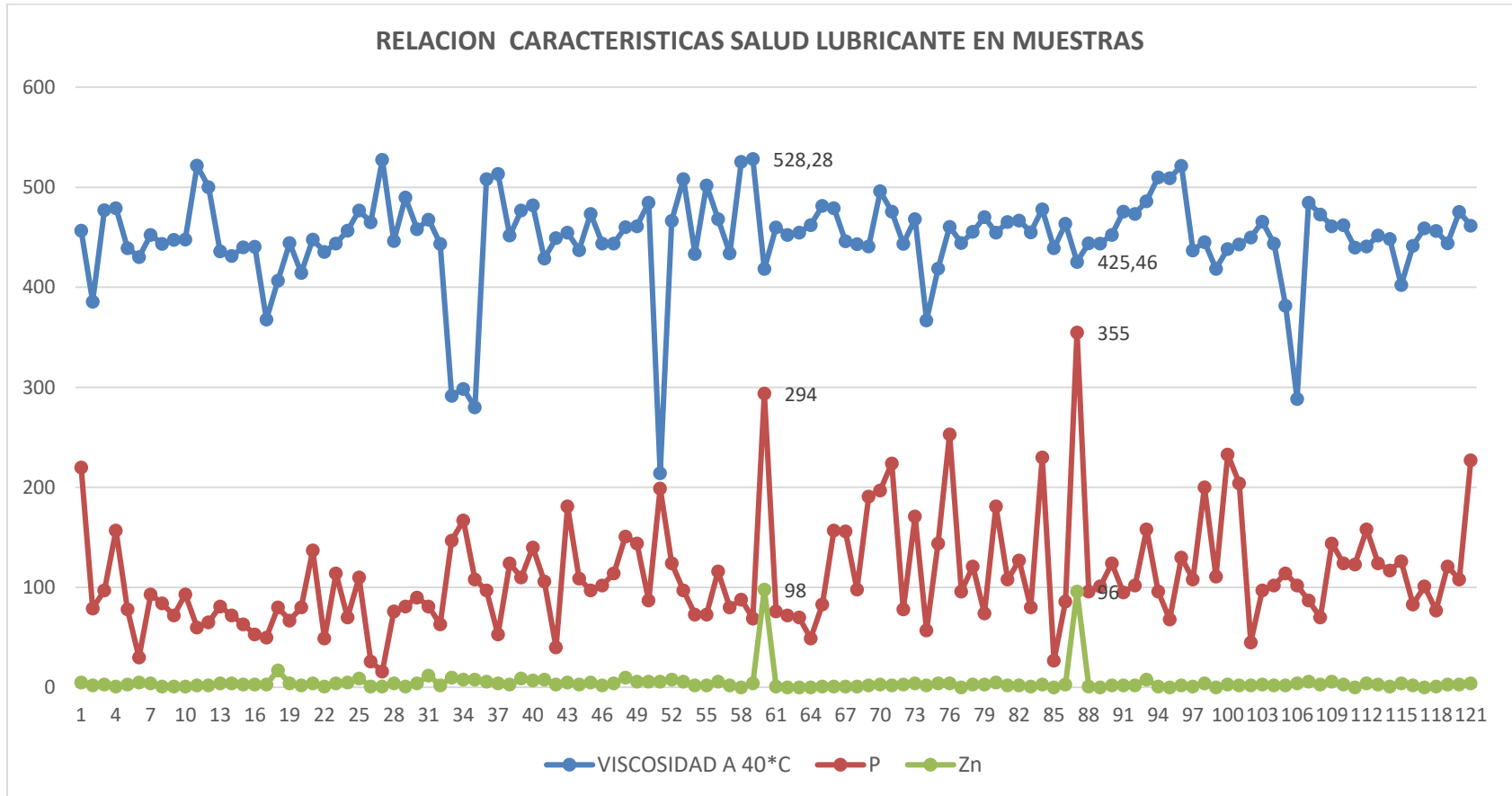
Teniendo lo anterior se procede a ejecutar un análisis de tendencias en busca de interrelaciones o modos de falla en conexión seriada.

Aplicando la técnica SACODE, en lo referente a una tendencia generalizada de los 323 muestreos vigentes para las 31 unidades en estudio se considera lo siguiente:

- ✓ **SALUD:** Ejecutando una extrapolación de los datos de salud, fosforo como aditivo de extrema presión y zinc (aditivo anti oxidante), y estos como pueden interactuar o generar patrones con los valores de viscosidad (ver grafica 1)

- Los patrones de relación entre el aumento o reducción de la viscosidad y sus paquetes aditivos no son uniformes. En algunos resultados se ven patrones, pero estos dependen de valores ajenos a estas tres variables.
- Se podría generalizar una relación en conjunto de aumento o reducción de paquetes aditivos tales como fosforo y zinc. Esto se puede interpretar como lubricante recientemente puesto en servicio.

Grafica 1. Relacion características salud lubricantes en muestras.



Fuente. Elaboración Propia

CONTAMINACION.

Para este escenario se procede a realizar graficas en diferentes escenarios para poder evaluar posibles relaciones.

- **ESCENARIO 1. Relación de contaminantes con tasa de desgaste de metales blandos tales como el cobre y el plomo con el contaminante principal (silicio).**

En este escenario se demuestra claramente como el silicio aumenta y genera desgaste en etapa erosiva en los metales blandos. Esto puede llegar a generar afectación en canastillas de los rodamientos, desgaste en bujes del eje de baja velocidad generando ruido en la caja por perdida de alineación en componentes (ver grafica 2).

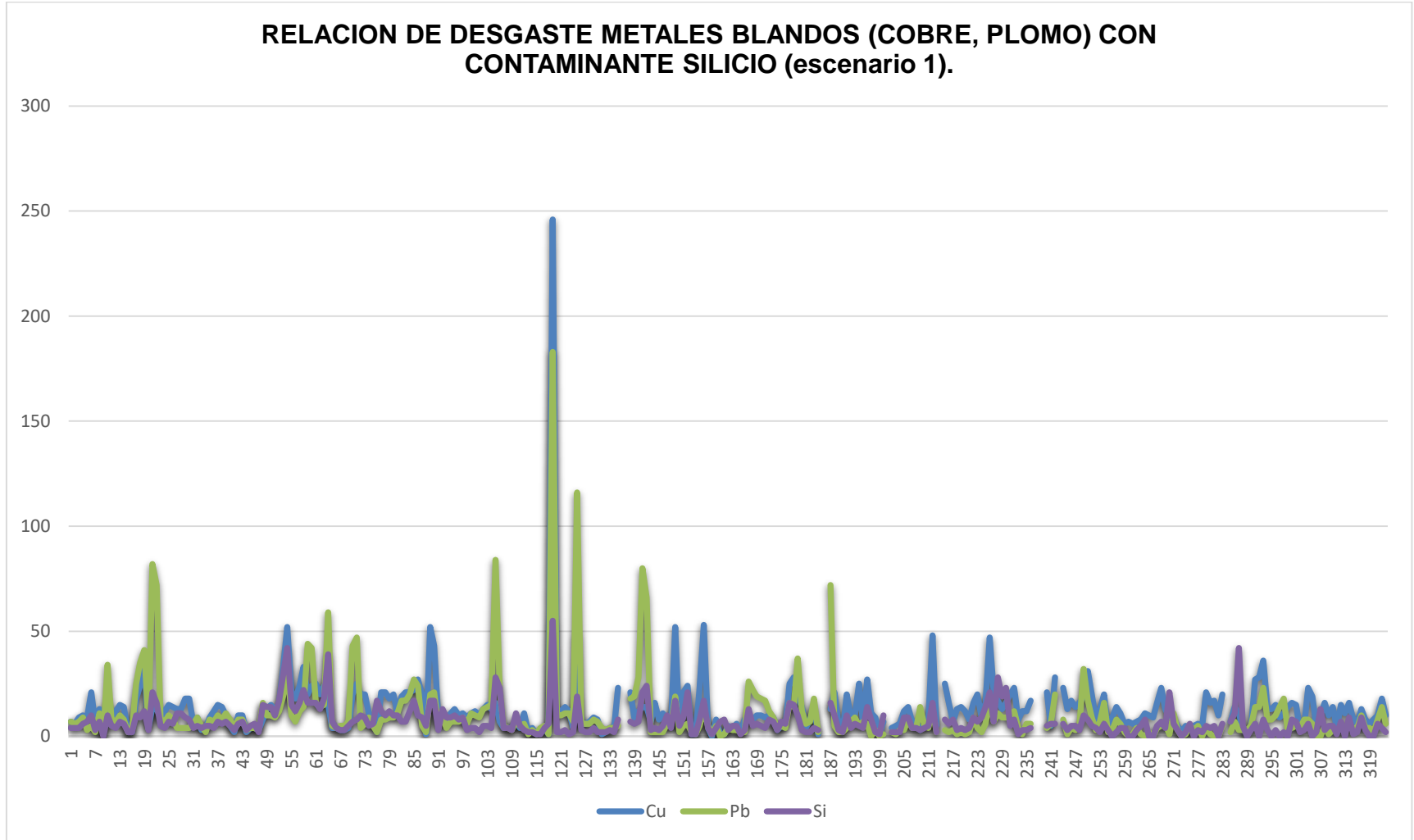
- **ESCENARIO 2. Relación de contaminantes con desgaste (silicio) en hierro.**

En este escenario las relaciones de silicio y su potencial afectación en desgaste de metales como hierro no son uniformes o acordes, es decir que la tendencia de desgaste o aumento de hierro no depende como factor fundamental por la presencia de silicio en el lubricante (ver grafica 3).

- **ESCENARIO 3. Relacion de acidez del lubricante con el silicio contaminante.**

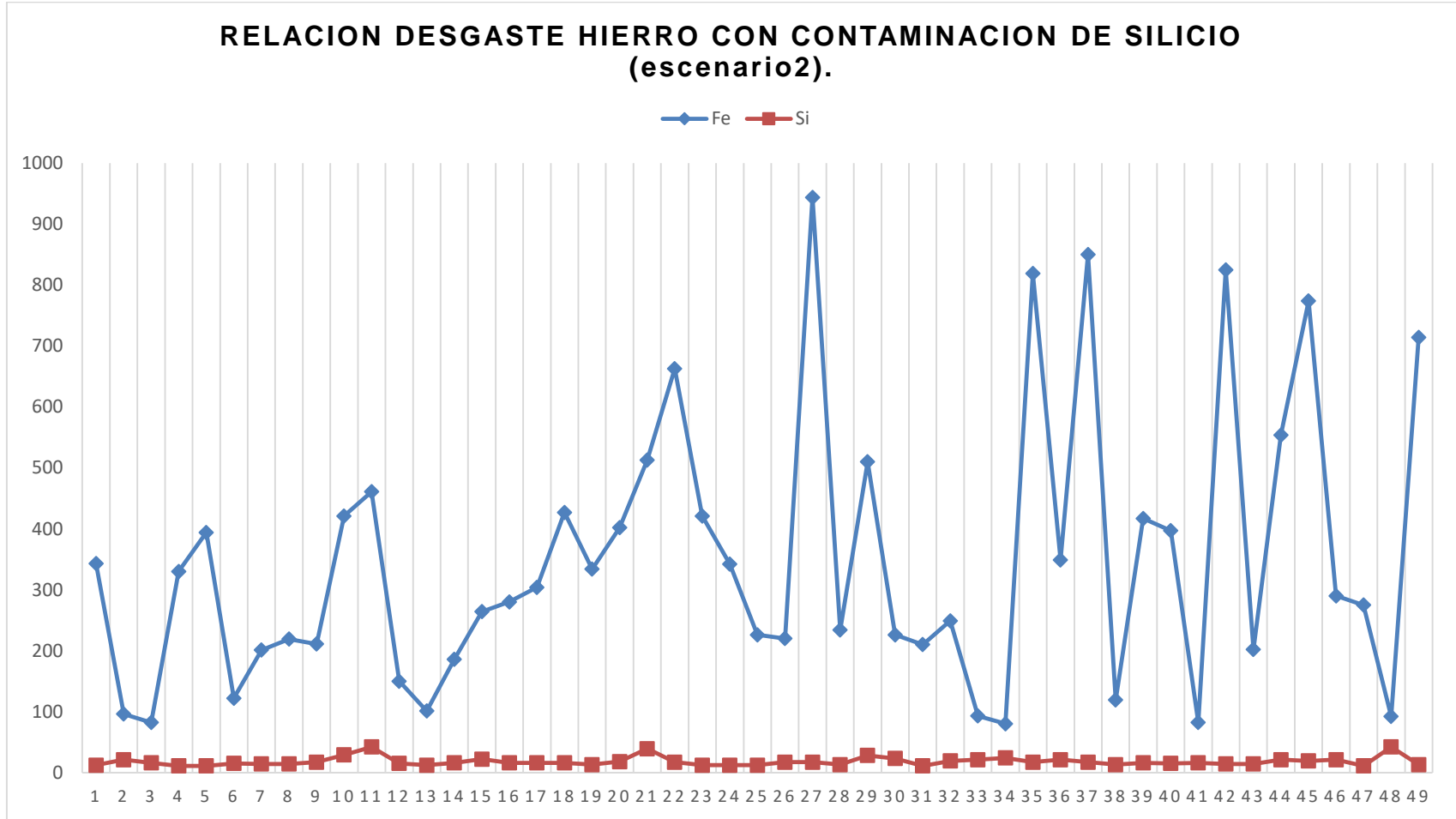
En este escenario no se evidencia relación entre la contaminación de silicio con la potencial afectación o aumento de acidez de la base del lubricante (ver grafica 4)

Grafica 2. Relación de desgaste metales blandos con contaminante silicio.



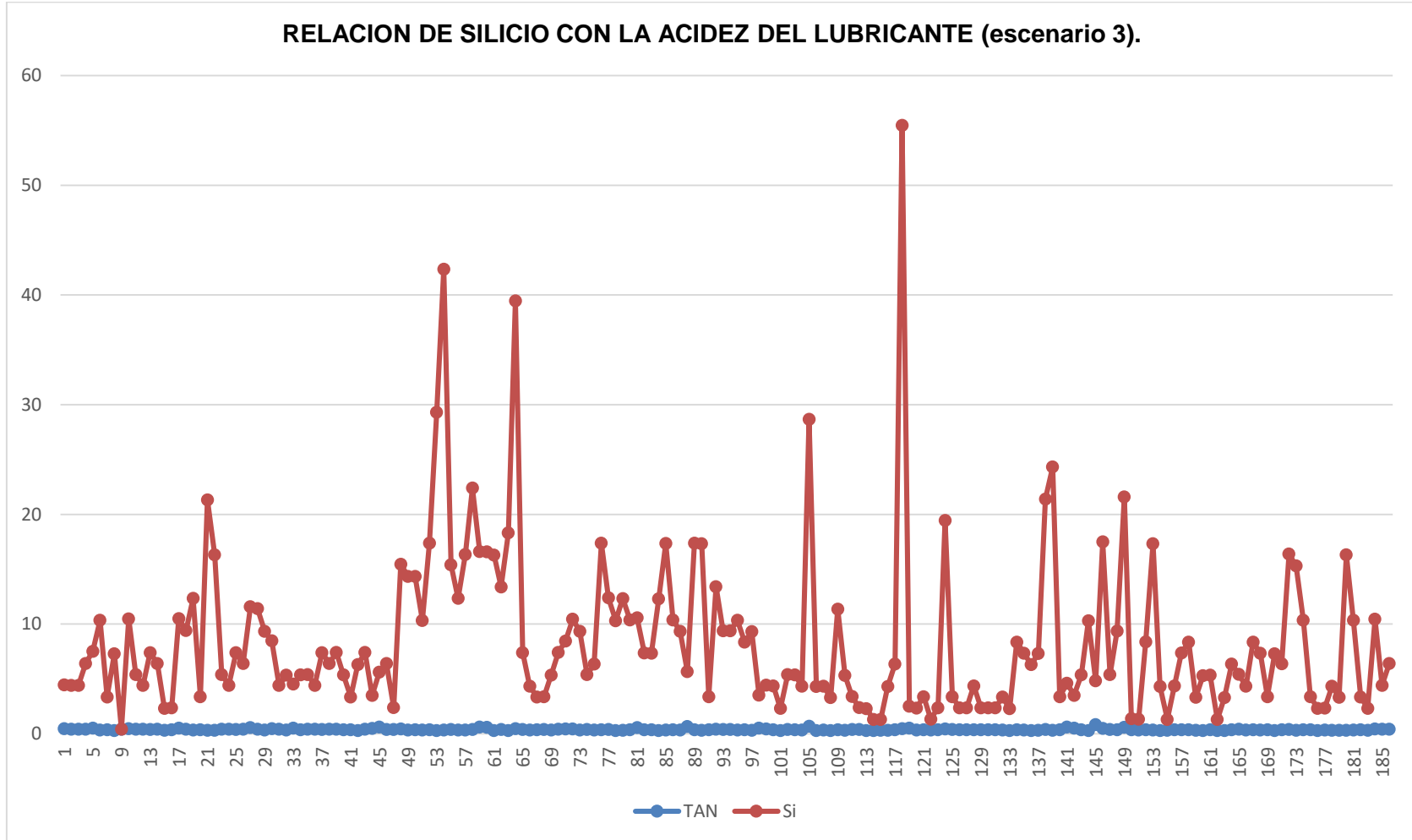
Fuente. Elaboración propia

Grafica 3. Relación desgaste Hierro con contaminante de silicio.



Fuente. Elaboración Propia

Grafica 4. Relación de silicio con la acidez del lubricante.



Fuente.Elaboración Propia

DESGASTE.

Para este escenario se procedera a realizar comparaciones entre los valores de desgaste y su potencial relacion con las variaciones de la viscosidad, acidez y humedad o emulsion.

- **ESCENARIO 1. Relación de la viscosidad con los elementos de desgaste (escenario 1).**

Para este escenario no se evidencia una concordancia entre las variaciones de los valores de viscosidad y la tasa de desgaste de metales. Estos desgastes dependen de otros valores no presentes en este escenario (ver grafica 5)

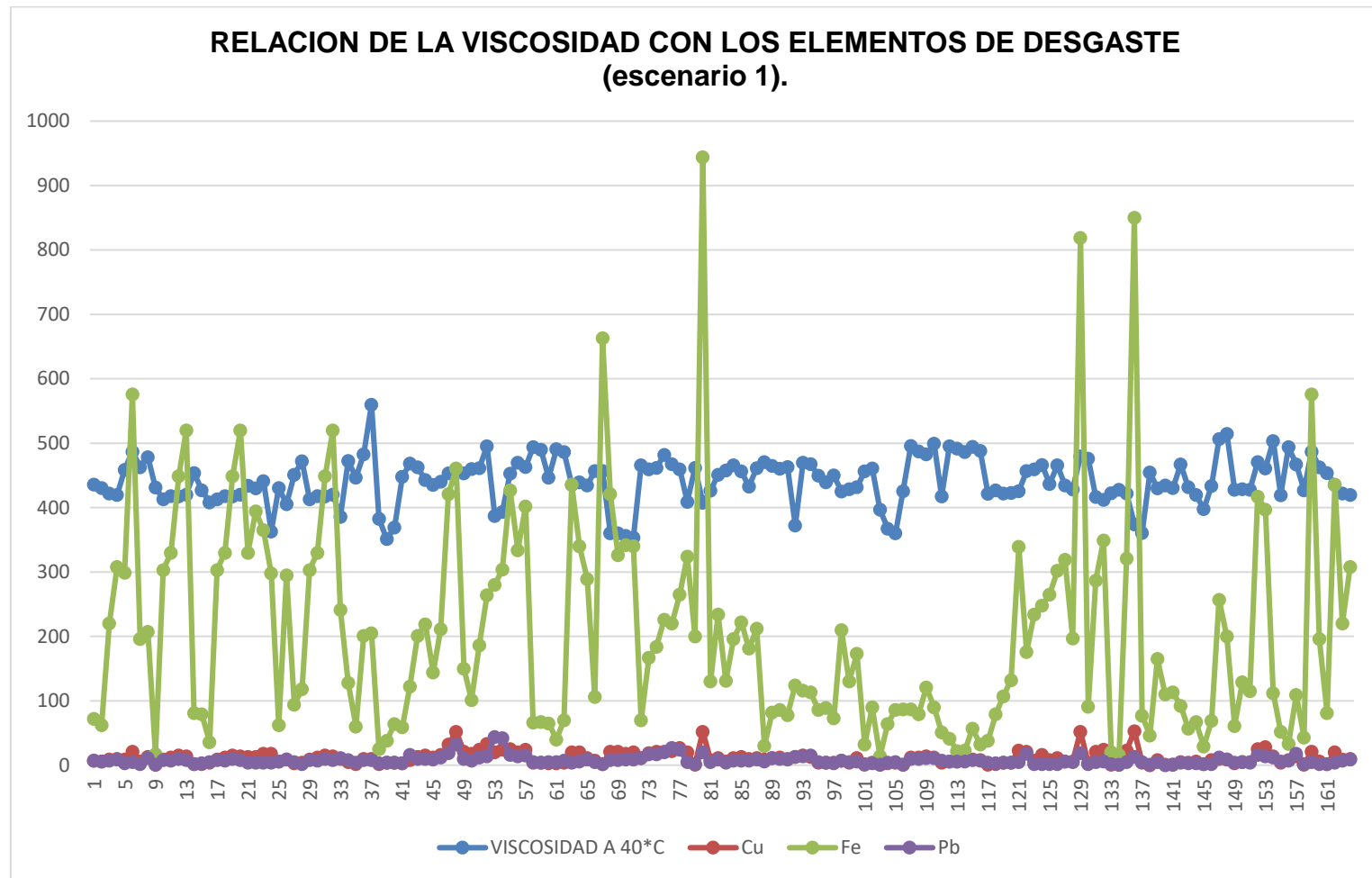
- **ESCENARIO 2. Relación de humedad con la tasa de desgaste de hierro**

Para este escenario se evidencia una concordancia entre las variaciones de los valores de tasa de desgaste de hierro con los valores de humedad en la mayoría de los valores pico de hierro, es decir se puede concluir que el agua es la causante principal de esta anomalía (ver grafica 6)

- **ESCENARIO 3. Relación de humedad con la tasa de desgaste de plomo, cobre.**

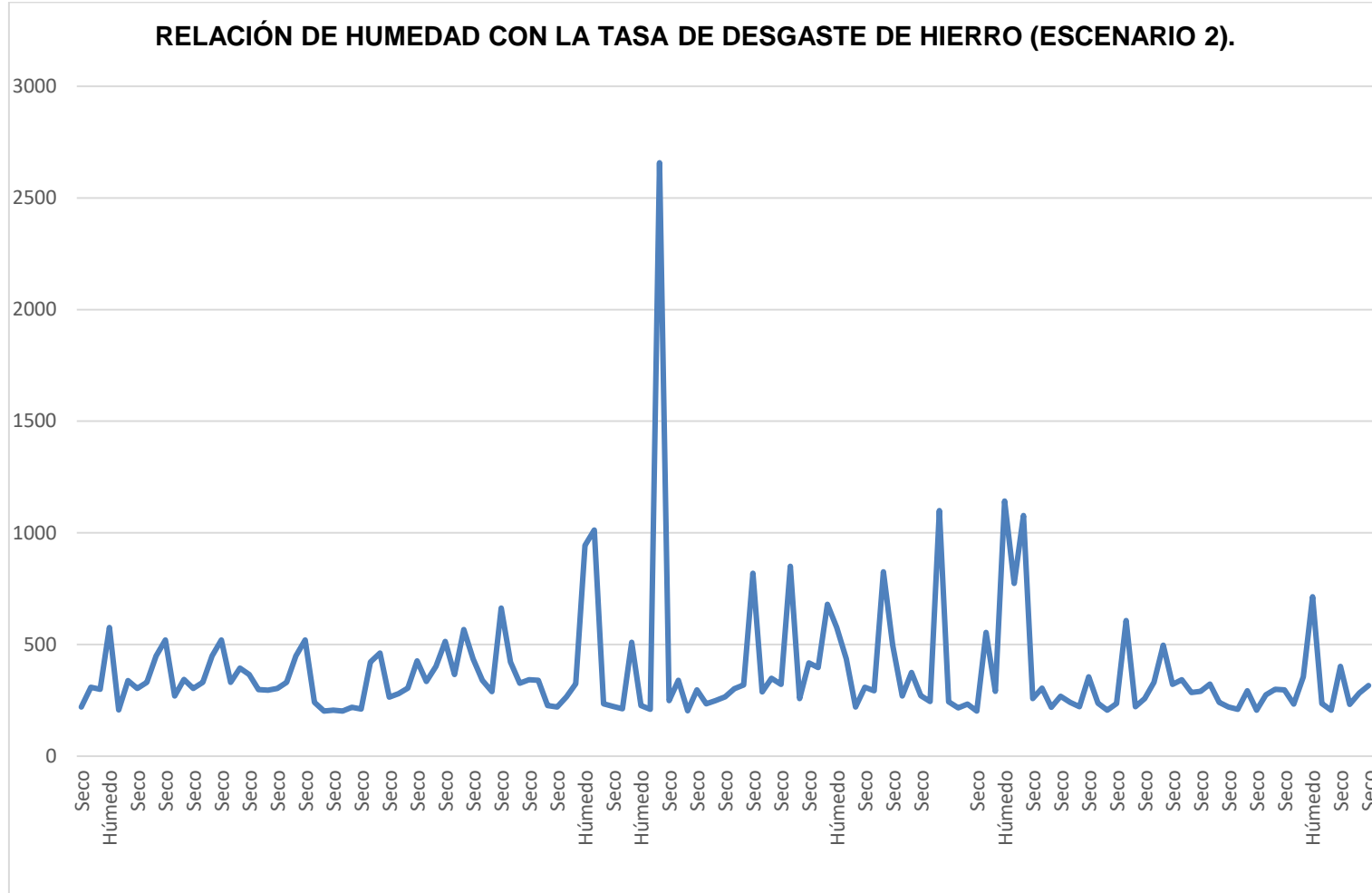
Para este escenario no se evidencia una concordancia entre las variaciones de los valores de viscosidad y la tasa de desgaste de metales blandos. Estos desgastes dependen de otros valores no presentes en este escenario (ver grafica 7)

Grafica 5. Relación de la viscosidad Vs elemento de desgaste



Fuente. Elaboración Propia

Grafica 6. Relación de la presencia de humedad Vs elementos de desgaste en hierro.



Fuente. Elaboración Propia

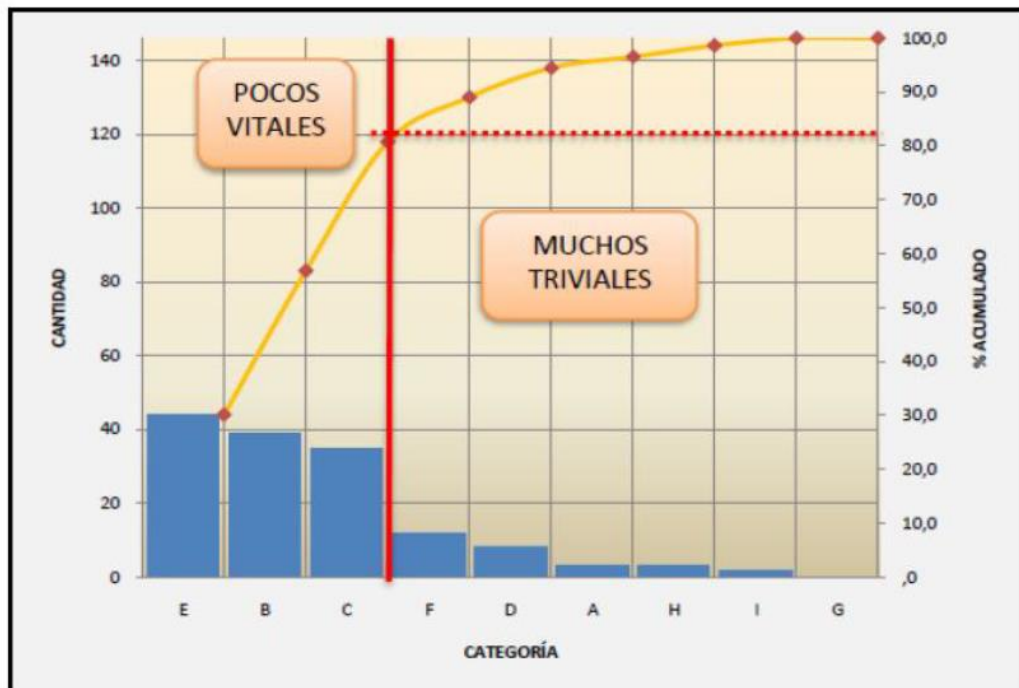
6.2 ANALISIS DE PARETO.

El analisis de pareto o regla del ABC, es una herramienta de jerarquizacion organizada de datos, con el fin de mostrar un tema del que se esta analizando y su posible tabulacion por de estos por repetitividad en lapsos de tiempo.

Aplicando la tecnica de analisis de Pareto (figura 24) ,se pueden evidenciar problemas con suma relevancia. El principio de pocos vitales y muchos triviales , o conocido de la regla del 80-20, o es decir los valores relevantes 80%, se sistribuyen en el 20% de las posibles variables.

El objetivo de aplicaci3n de esta herramienta , no es mas que poder definir la repetitividad de acciones de mantenimiento enfocanda en unos pocos modos de falla con base en los reportes de condicion de lubricante de las unidades en estudio que generaron acciones de mantenimiento.

Figura 24. Diagrama de Pareto.



Fuente. MONCADA , Davian A. Seminario de investigacion de metodologias de fallas . Bucaramanga 2009.

Basado a lo anterior expuesto , en la aplicación de la herramienta del Pareto deseamos obtener los siguientes aciertos y beneficios:

- Identificar las oportunidades de mejora potenciales.
- Identificar los equipos o componentes con mayor frecuencia de fallas.
- Analizar datos, agruparlos y definir sus pesos y potenciales de beneficio.
- Comparar resultados antes y despues de la aplicación de la herramienta.
- Convertir estos datos en valores de ahorro en dinero.

6.2.1 Caracterizacion de las causas de intervencion de las cajas reductoras.

Para la primera causa tenemos de los 323 analisis de lubricantes generados, 8 acciones de intervencion a la caja reductora asociadas a contaminacion del lubricante con agua, su emulsion y degradacion.(ver tabla 3)

Tabla 3.Caracterizacion de las fallas presentadas por humedad en cajas reductoras.

NOMBRE DEL POZO	FECHA DE TOMA	CARACTERÍSTICA DE HUMEDAD	CAUSA 1
CARDALES 6	25-may-18	Húmedo	contaminación con agua
LISAMA 161	15-jun-18	Húmedo	contaminación con agua
GALA 8	12-jul-18	Húmedo	contaminación con agua
LLANITO 130	24-ago-19	Húmedo	contaminación con agua
GALA 8	7-dic-18	Húmedo	contaminación con agua
GALA 6	8-ago-19	Húmedo	contaminación con agua
LISAMA 161	23-ene-19	Húmedo	contaminación con agua

Fuente. Elaboración Propia.

Para la segunda causa tenemos de los 323 análisis de lubricantes generados, 20 acciones de intervención a la caja reductora asociadas a contaminación del lubricante con hierro. En este escenario se genera cambio del lubricante, inspección de los componentes internos (engranes) por potencial daño en dientes y desgaste abrasivo por partículas de hierro que pueden dañar los componentes en metales blandos asociadas a juntas del eje de baja velocidad, así como la canastilla de los rodamientos (ver tabla 4).

Tabla 4 Caracterización de las fallas presentadas por humedad en cajas reductoras.

NOMBRE DEL POZO	FECHA DE TOMA	CAUSA 2	HIERRO EN PPM
CARDALES 5	25-may-18	hierro	825
CARDALES 5	11-ene-18	hierro	496
LLANITO 107	15-may-18	hierro	375
GALAN 74	15-mar-18	hierro	1100
LLANITO 119	25-may-18	hierro	554
LISAMA 161	15-jun-18	hierro	1143
LISAMA 161	22-jun-18	hierro	774
LISAMA 161	29-nov-18	hierro	1078
NUTRIA 33	25-may-18	hierro	304
CARDALES 6	12-jul-18	hierro	355
NUTRIA 15	28-dic-17	hierro	607
LLANITO 107	8-feb-19	hierro	330
CARDALES 5	1-nov-18	hierro	496
CARDALES 5	11-jul-19	hierro	321
CARDALES 5	1-ago-19	hierro	342
CARDALES 15	24-ago-19	hierro	323
CARDALES 6	7-dic-18	hierro	355
LISAMA 161	23-ene-19	hierro	714

NUTRIA 35	20-dic-18	hierro	402
NUTRIA 35	1-ago-19	hierro	316

Fuente. Elaboración Propia.

Para la tercera causa tenemos de los 323 analisis de lubricantes generados, 4 acciones de intervencion a la caja reductora asociadas a contaminacion del lubricante por elevada tendencia de cobre. Esto se da por factores aleatorios que conyeban a este desgaste (ver tabla 5).

Tabla 5. Caracterización de las fallas presentadas por elevada tasa de desgaste de cobre.

NOMBRE DEL POZO	FECHA DE TOMA	CAUSA 3	COBRE
GALAN 74	15-mar-18	cobre	48
LLANITO 119	25-may-18	cobre	47
NUTRIA 28	28-dic-17	cobre	31
NUTRIA 28	8-ago-19	cobre	36

Fuente. Elaboración Propia.

Para la cuarta causa tenemos de los 323 análisis de lubricantes generados, 1 acción de intervención a la caja reductora asociadas a contaminación del lubricante por elevada tendencia de plomo. Esto se da por factores aleatorios que conyeban a este desgaste entre estos se tienen como hipótesis factores de desalineamiento de la caja reductora con el conjunto potencia a varilla al pozo (ver tabla 6).

Tabla 6. Caracterización de las fallas presentadas por elevada tasa de desgaste de plomo.

NOMBRE DEL POZO	FECHA DE TOMA	CAUSA 4	Pb
NUTRIA 15	28-dic-17	plomo	32

Fuente. Elaboración Propia.

Para la quinta causa tenemos de los 323 análisis de lubricantes generados, 16 acciones de intervención a la caja reductora asociadas a contaminación del lubricante por elevada tendencia de silicio. como demostramos páginas arriba esta contaminación de tierra genera desgaste de tipo erosivo en componentes de metales

blandos tales como canastilla de los rodamientos de los ejes de alta velocidad, así como de los bujes del eje de baja velocidad (ver tabla 7)

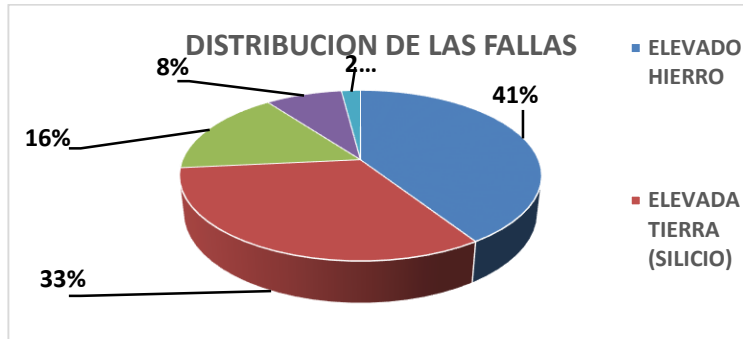
Tabla 7. Caracterización de las fallas presentadas por elevada presencia de contaminante en silicio.

NOMBRE DEL POZO	FECHA DE TOMA	CAUSA 5	Si
CARDALES 2	4-feb-13	silicio	21
LLANITO 18	25-sep-14	silicio	29
LLANITO 99	29-oct-13	silicio	42
LLANITO 99	29-sep-14	silicio	22
NUTRIA 42	1-nov-12	silicio	39
LLANITO 114	26-ago-11	silicio	28
LLANITO 114	18-ene-13	silicio	23
NUTRIA 33	23-oct-12	silicio	55
CARDALES 2	23-abr-13	silicio	21
CARDALES 2	2-dic-13	silicio	24
GALA 8	22-ene-16	silicio	21
LLANITO 119	25-may-18	silicio	21
LISAMA 161	15-jun-18	silicio	28
LISAMA 161	29-nov-18	silicio	23
CARDALES 15	1-mar-19	silicio	21
LLANITO 107	24-ago-19	silicio	42

Fuente.Elaboración Propia.

6.2.2 Distribucion de las fallas.

Grafica 8. Distribución de los contaminantes en los lubricantes de las cajas reductoras.



Fuente.Elaboración Propia.

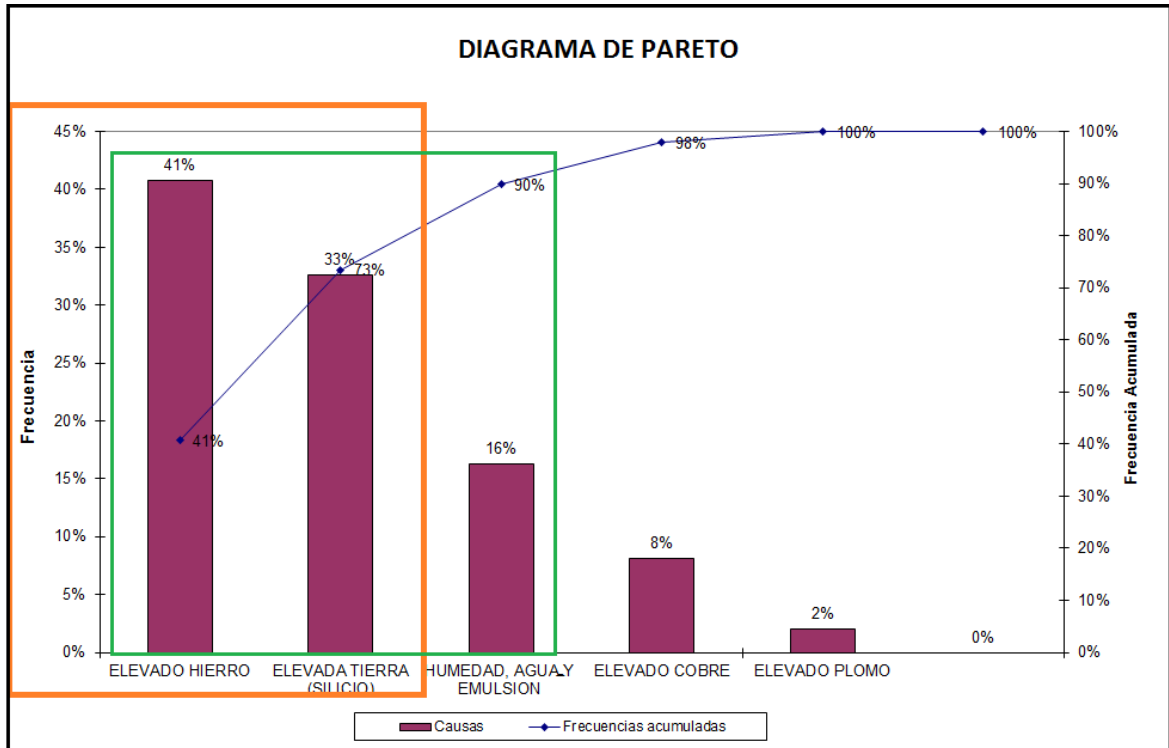
Tabla 8 . (continuación) Distribución de los contaminantes en los lubricantes de las cajas reductoras.

CAUSAS	FRECUENCIA	FREC. NORMALIZ	FREC. ACUMULADA
ELEVADO HIERRO	20	41%	41%
ELEVADA TIERRA (SILICIO)	16	33%	73%
HUMEDAD, AGUA Y EMULSION	8	16%	90%
ELEVADO COBRE	4	8%	98%
ELEVADO PLOMO	1	2%	100%

Fuente. Elaboracion propia

6.2.3 Distribucion de pareto (diagrama).

Figura 25. Distribución de Pareto.



Fuente.Elaboración Propia.

6.2.4 Comentarios. El 74% de las acciones de mantenimiento en las cajas reductoras son asociadas a presencia de elevado hierro en el lubricante y posterior presencia de silicio (tierra).(ver grafica 8)

- Como una accion de integracion en los analisis de lubricante y en posibles modos de falla, se integra al 80% de las causas frecuentes la emulsion con agua, llegando a una proporcion 90-10 (ver figura 25).

- Identificando las 3 causas que mas se repiten por las cuales se generan acciones de mantenimiento y los recursos que estos conllevan se procedera a realizar un analisis de causa raiz para la identificacion del origen de falla y sus acciones de control y correccion.

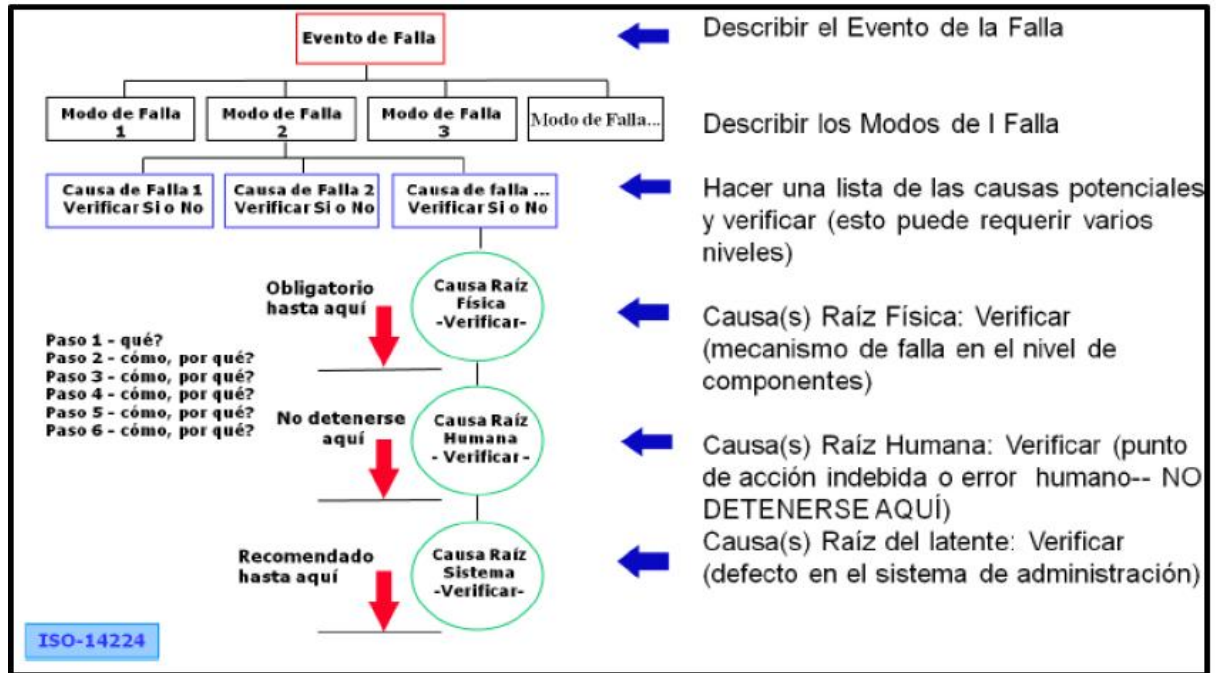
6.3 ANALISIS DE CAUSA RAIZ.

6.3.1 Construcción de un árbol lógico de falla. El analisis continua con la generacion de un arbol logico de falla, con su debida jerarquizacion de causa y efecto, tratando datos reales y aplicando la logica deductiva del conocimiento tecnico de los activos asi como la experiencia en el campo se generan los caminos para llegar a la causa raiz real.

6.3.1.1 Secuencia de pasos y procedimiento.

- Descripcion detallada del proceso de falla.
- Descripcion de los modos de falla.
- Listar las causas potenciales, identificarlas y verificarlas.
- Verificar y determinar causas fisicas.
- Verificar y determinar causas humanas.
- Verificar y determinar causas latentes o causa raiz.

Figura 26. Instructivo para el desarrollo de causas raíz.



Fuente. ECOPEPETROL S.A. Gerencia de Operaciones de Mares.

Los bloques de causa de fallas se utilizan para determinar cómo y por qué el anterior bloque de modos de falla pudo haberse presentado (ver figura 26). Se deben considerar todas las posibilidades e incluirlas en su totalidad. Para determinar las causas de la falla es útil preguntarse:

- ¿Cuándo ocurre? ¿A qué hora? ¿Qué efectos tiene? ¿Por qué ocurre?
- Qué condiciones especiales se presentaron o existían y que modificaciones
- ¿Se han hecho? ¿Cómo ocurre?

Más adelante se eliminan las causas poco realistas. Es necesario preguntarse nuevamente cómo y por qué pudo haber ocurrido esto. Se continúa en este paso analizando todas las posibles causas creíbles que pudieron presentarse para resultar en el modo de falla anotado.

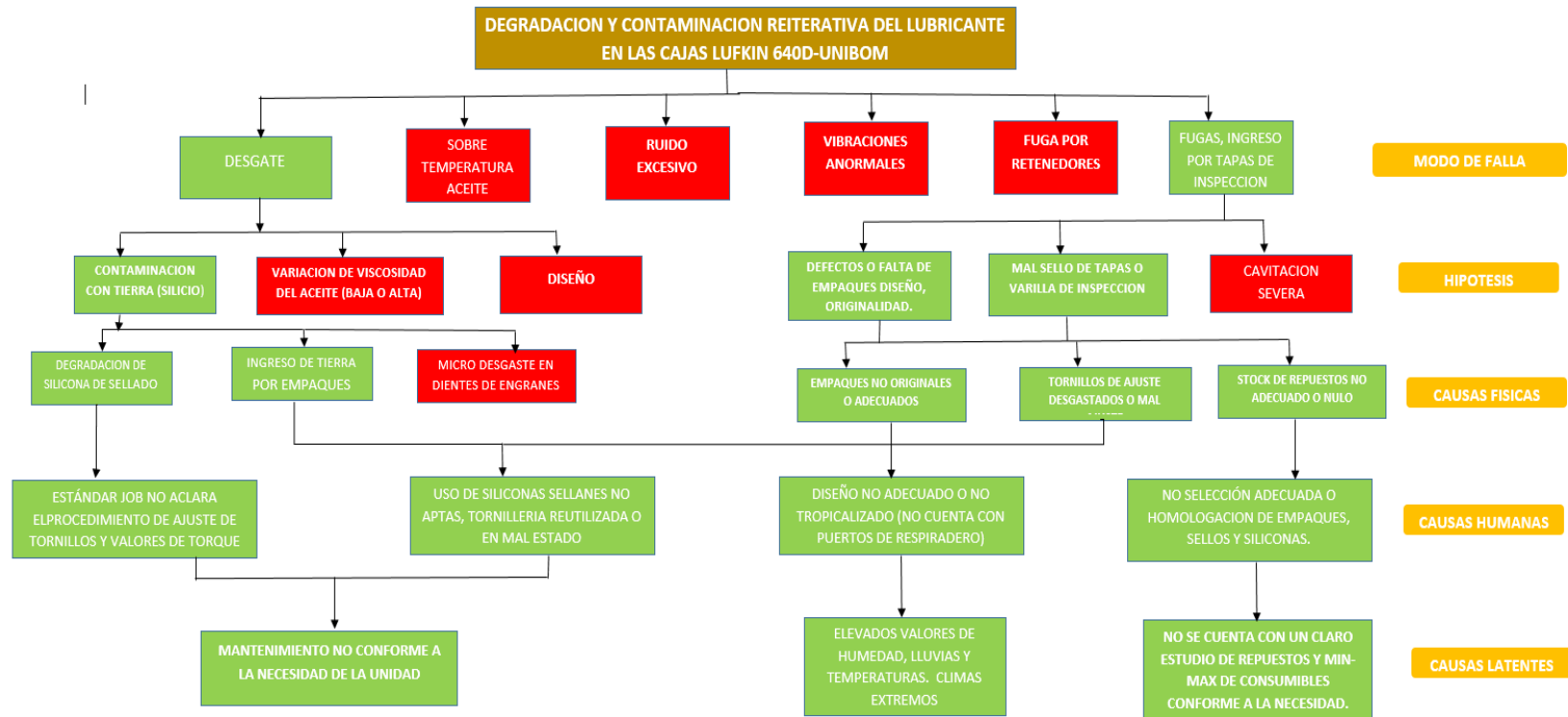
Verificación de hipótesis: Cada bloque de hipótesis del árbol lógico necesita ser verificado (demostrado o refutado). Este es uno de los pasos más importantes en el proceso RCA. Sin la verificación, los hallazgos y recomendaciones del RCA no tienen sentido.

Es necesario buscar evidencia con hechos que soporten, verifiquen o desapruében cada causa potencial. De lo contrario, se debe incluir “sin evidencia” o “no se puede probar” y asignarle una probabilidad de que ésta sea la causa.

6.3.1.2 Los métodos de verificación pueden incluir. Observación Visual: Fotografía de alta velocidad, cámaras de video, luces estroboscópicas, observación humana.

- Evaluación No-Destructiva: Técnicas de inspección con ultrasonido, rayos X, infrarrojos u otro tipo de inspección, ferrografía (análisis de aceite), metalografía in-situ (remoción y análisis de metal), microscopia electrónica de scanner, análisis de esfuerzo, vibración, muestreo en laboratorio de fluido o gas, en conclusión, cualquier técnica no destructiva que pueda generar información y solución a la falla.
- Análisis de Datos: Regresión (tendencias), análisis de vibración, modelación, big data. Tendencias de lubricante. termografía. Posterior se verifique las causas potenciales y la evidencia al nivel de componente, han llegado a la Causa Raíz Física de la falla.

Figura 27. Árbol lógico de fallas.



Fuente. Elaboración Propia .

6.3.1.3 Validación y al árbol lógico de falla. Teniendo presente las conclusiones generadas por el análisis de causa raíz y su árbol lógico de falla se valida los hallazgos para poder gestionar los planes de acción para la neutralización de los malos actores y eliminación de las cuasas latentes. (ver figura 27).

6.3.1.4 Mantenimiento no conforme a la necesidad de la unidad. En la verificación del estándar job de actividad de mantenimiento por inspección y cambio de lubricante, no se evidencia y se precisa el uso de los empaques de sello, así como el uso de tornillería conforme y torqueo conforme al tipo de elemento con exposición. (ver figura 28).

Figura 28. Procedimiento para cambio de lubricante.

PROCEDIMIENTO PARA CAMBIO DE ACEITE A LA CAJA REDUCTORA DE LA UNIDAD DE BOMBEO MECÁNICO		Versión: 2.0
		Código: P189-OYM-MEC-05-06-050
PASO N° 3. Retirar tapón de drenaje de la caja reductora.		
3.1 Ubicar sistemas de protección anti caídas, retirar Tapa o tapas superiores.		
3.2 Preparar conexiones de drenaje o bomba de vacío.		
3.3 Retirar el tapón de drenaje utilizando llaves boca-fija (varias).		
3.4 Depositar el aceite drenado o succionado por la bomba de vacío en un recipiente para realizar disposición final en el área autorizada por el cliente.		
NOTA: Instale un balde en la parte inferior de tapón de drenaje de la caja reductora con el propósito de prevenir cualquier drenaje derrames.		
3.5 Instale manualmente el tapón de drenaje la caja reductora, con el fin de proceder con la limpieza.		
PASO N° 4. Limpieza de la Caja reductora de la Unidad de Bombeo.		
4.1 Vierta desengrasante Industrial en la caja reductora.		
4.2 Limpie cualquier exceso de aceite deteriorado del interior de la caja reductora.		
4.3 Revise visualmente estado de los rodamientos o Bujes.		
4.4 verifique estado de los raspadores y canales de lubricación. Eliminando de ellos cualquier suciedad o Obstrucción.		
4.5 Observe los estados de los dientes de los Piñones de los Ejes de Alta, Intermedia y Baja, identificando posible falta de dientes o filos o rebabas en los mismos.		
4.6 Limpie y/o Extraiga el desengrasante, vierta cuidadosamente un poco de aceite y drénelo. Limpie o seque los residuos.		
4.7 Cierre los Drenajes y revise todos los pernos de la Caja reductora que no estén flojos o Faltantes.		

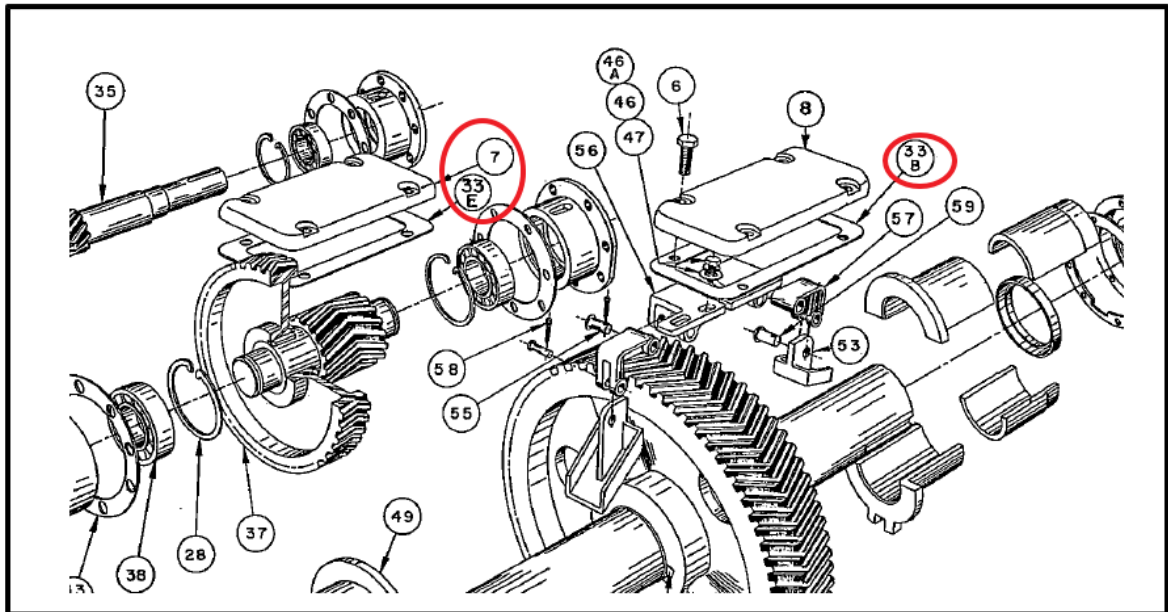
Fuente. Mecanicos Asociados S.A.S.

6.4 VALORES DE HUMEDAD ELEVADOS Y CONCENTRACION DE HUMEDAD EN LA UNIDAD.

En lo referente a esta causa latente, es importante precisar que las cajas reductoras no cuentan con un puerto de respiración, ni punto para adaptar uno. Adicional teniendo presente la metalurgia de la fundición de la carcasa, es quien cuando los valores de humedad (vapor) se condensa por las variaciones de temperatura en el área de operación (día y Noche), se adhiere a la superficie interna de la cara de la tapa generando pitting y corrosión. Esta corrosión cae en los dientes de engranes de la caja siendo distribuida en el lubricante generando la afectación del lubricante y componentes diseñados con metales blandos.

Adicional esto se relaciona por el no uso de empaques en las tapas de inspección, aplicación de silicona líquida para generar un “sello” y el torqueo no controlado que permite que la tapa presente áreas de contacto firme y otras de contacto falso. (ver figura 29).

Figura 29. Grafico despiece componentes internos unidad 640D.



Fuente. LUFKIN. Manual de partes.

(Continuación). Gráfico despiece componentes internos unidad 640D.

<u>ITEM</u>	<u>PART NO</u>	<u>DESCRIPTION</u>
33	AM124520	Gaskets, Set, Gear Box
33A	AP008565	Gasket, Bearing Carriers
33B	AM124518	Gasket, L. S. Inspection Cover
33C	AP123987	Gasket, Oil Seal
33D	AP009480	Gasket, Oil Drain Cover Plate
33E	AP008564	Gasket, H. S. Inspection Cover
34	N9085462	Cap Screw, Brg. Carrier, 3/4 x 2
35	RM000760	Pinion, H.C.

Fuente LUFKIN. Manual de partes.

6.4.1 No se cuenta con un claro estudio de repuestos, min y max en bodega de materiales. Verificando en bodega de materiales, no se tiene catalogado los empaques de las tapas. Se cuenta con código de catalogación para los tornillos, pero estos no cuentan con stock ni con valores definidos de mínimos o máximos de reposición.

En la investigación arrojo que cuando se cuenta con papel en teflón, se elaboran manualmente los empaques. En la mayoría de los ejemplos los técnicos no conocen el calibre de espesor del papel.

Más importante aún, es que se tropicaliza la idea de usar siliconas líquidas para generar sello. Estas siliconas son fabricadas con silicatos que no es más que tierra en tamaño de menos de 5 micras. Si se aplica exceso de silicatos se convierten en falsos positivos de silicio en los análisis de lubricante y su afectación y desgaste de elementos de metales blandos. (ver diagrama de Pareto).

6.5 MODOS DE FALLA.

NORIA, Latinoamérica, nos da un aproximado de las causas y sus acciones de inspección para el control. En su documento "MATRIZ DE ACCIONES ANTE RESULTADOS ANORMALES DEL ANÁLISIS DEL LUBRICANTE", nos visualiza

una guía clara de acciones para la evaluación de anomalías, sus alertas por síntomas y las acciones de control (Ver tabla 9 y 10).

Tabla 9. Matriz de acciones ante resultados anormales de análisis del lubricante.

Propiedad	Síntoma	Recomendaciones
Demulsibilidad	<ul style="list-style-type: none"> Corrosión (desgaste) superficies ferrosas y no ferrosas 	<ul style="list-style-type: none"> Presencia de metales de desgaste ocasionada por corrosión y falla de la resistencia de película del lubricante. Dependiendo del nivel de desgaste, programar revisión de componentes desgastados
	<ul style="list-style-type: none"> Contaminación con lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> La presencia de aditivos detergentes (calcio, magnesio) indican contaminación con aceite de motor. Revisar métodos y accesorios de aplicación del lubricante a la maquinaria. Programar cambio de aceite Verificar tipo de aceite usado como relleno o cambio por contaminación. De ser positiva, cambiar lubricante
Desgaste - Espectrometría de Metales, Densidad Ferosa,	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste de los componentes de la máquina 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar presencia de metales de desgaste (hierro, plomo, cobre, etc.). Dependiendo del nivel programar intervención de la máquina para revisar componentes desgastados
	<ul style="list-style-type: none"> Incremento código de 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar estrategias para evitar el ingreso de contaminantes al sistema (filtros de aire, respiraderos, desecantes, sellos, tapas, etc.). En caso

Fuente. Noria latinoamerica.

Tabla 10. Matriz de acciones ante resultados anormales del análisis del lubricante.

Propiedad	Síntoma	Recomendaciones
Conteo de Partículas Contaminación Sólida	<ul style="list-style-type: none"> Incremento en el código de contaminación sólida 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar estrategias para evitar el ingreso de contaminantes al sistema (filtros de aire, respiraderos, desecantes, sellos, tapas, etc.). En caso de ingreso utilizar técnicas de remoción de contaminantes sólidos (sedimentación, filtración con tasa β y tamaño de partícula adecuado con los sistemas de filtración del equipo, filtración magnética y separadores de partículas electrostáticas y partículas cargadas) Si no hay presencia de metales de contaminantes (silicio, aluminio, boro, calcio, etc.) o de metales de desgaste (hierro, cobre, plomo, etc.) se debe proceder a investigar el nivel de limpieza del aceite nuevo, los accesorios utilizados para el manejo y aplicación de lubricantes a la maquinaria, los procedimientos de relleno y cambio de aceite, el ambiente que rodea la maquinaria (pulpa de papel, bagazo de caña, trapos, estopa, trazas de mangueras y filtros, etc.) o cualquier otro tipo de contaminante no metálico que pueda entrar y contaminar el equipo
	<ul style="list-style-type: none"> Incremento en metales de desgaste y contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar presencia de metales de desgaste (hierro, plomo, cobre, etc.). Dependiendo del nivel programar intervención de la máquina para revisar componentes desgastados
Agua por Karl Fisher o Crepitación	<ul style="list-style-type: none"> Incremento/disminución de viscosidad Oxidación del aceite Espuma y aire atrapado Incremento del Número Ácido (AN) 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar temperaturas de operación. Baja temperatura produce condensación. Ajustar y remover con metodologías adecuadas (decantación, deshidratación, filtración con media absorbente o coalescente, aire seco de instrumentos, sparging, diálisis, centrifugación, etc.) Implementar tareas de drenaje del tanque para eliminar el agua separada o condensada en el fondo Si la contaminación es severa, drenar aceite y revisar por depósitos de lodos y barniz en la maquinaria. Utilizar técnicas adecuadas para la limpieza del equipo (lavado a presión, a alta temperatura, flujo invertido, limpieza con solventes, etc.)
	<ul style="list-style-type: none"> Hidrólisis de la base lubricante y aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> La hidrólisis contribuye al agotamiento de los antioxidantes. Revisar las estrategias para evitar su ingreso (filtros, respiraderos, desecantes, tapas, sellos, etc.). Utilizar metodologías adecuadas para su remoción (decantación, deshidratación, filtración con media absorbente o coalescente, aire seco de instrumentos, sparging, diálisis, centrifugación, etc.)

Fuente. Noria latinoamerica.

6.6 ANALISIS DE FACTOR COSTO BENEFICIO EN LA IMPLEMENTACION DE ESTAS ACCIONES.

Durante el lapso de analisis de la informacion, y basado en lo plasmado en el analisis de Pareto, para estas unidades se generaron 44 paradas por mantenimiento no programado las cuales generan diferidas mas gastos de mantenimiento (ver tabla 11).

Tabla 11. Costo promedio normalización por cambio de lubricantes.

DESCRIPCION	VALORES GLOBALES		VALOR POR INTERVENCION	
	CANTIDAD	COSTO	CANTIDAD	COSTO
SERVICIO DE CAMIÓN LUBRICADOR SIN OPERADOR	DIA	\$ 485.482	0,5	\$ 242.741
SERVICIO DE MTTO MECÁNICO TIPO 6 (Cargo D9-C6-Herramienta)	DIA	\$ 396.061	0,5	\$ 198.031
GALON DE ACEITE EP -460	GLN	\$ 25.500	70	\$ 1.785.000
PROMEDIO HORA DIFERIDA EN BARRILES HORA	2	\$ 384.000	4	\$ 1.536.000
VALOR CORRECCION NOVEDAD			\$ 3.761.772	

Fuente. Elaboración Propia.

Con los calculos anteriores, se contemplan gastos promedios de mantenimiento, diiferidas y perdida de ganancias por **165.517.968** pesos mcte.

La implementacion de tecnicas proactivas generadas por el analisis de este informe para las 31 unidades mas criticas, tienen un costo potencial de 29.552.615 pesos mcte (ver tabla 11)

Tabla 12. Costos promedio normalización de implementar técnicas proactivas.

DESCRIPCION	VALORES GLOBALES			
	ITEM	CANTIDAD	VALOR	
EMPAQUES	EA	2	\$ 55.000	\$ 55.000
FILTRO RESPIRADOR EN SILICA	EA	2	\$ 350.000	\$ 700.000
SERVICIO DE MTTO MECÁNICO TIPO 6 (Cargo D9-C6-Herramienta)	DIA	0,5	\$ 198.031	\$ 198.031
VALOR ACCIONES PROACTIVAS			\$ 953.031	

Fuente. Elaboración Propia

Finalmente si se implementa una rutina trimestral de revision adicional a la estrategia de muestreo en la que se estipule la verificacion y cambio de filtro en silica por condicion de saturacion, se potencializa a cero los gastos de mantenimiento salvo el costo de 350.00 pesos por cambio de filtro. Se excluye el valor de mano de obra ya que esta actividad se anexa a una rutina ya generada y el tiempo de cambio de un filtro de rosca es en promedio de 5 minutos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La compra de activos no tropicalizados, es decir su adaptación de servicio a los entornos locales que se caracterizan por humedades promedio diarias del 80% así como temperaturas altas y otros factores, pueden generar que estos activos no operen bajo los factores de fiabilidad y disponibilidad con los cuales fueron concebidos y probados en sus países de origen. Por lo anterior el análisis de anomalías y la evaluación de propuestas de mejoras como se plasman en este documento son la clave para la operación y producción rentable.
- El análisis de Pareto es una potente herramienta de análisis para la identificación de las ocurrencias de las fallas, en nuestro análisis siempre teníamos presente como ocurrencia principal siendo esta la de mayor impacto. Logramos entender que esta condición es una etapa final que tiene su prelación con el desgaste de hierro y las fases primarias de contaminación con agua en estado de vapor. Al igual esto nos puede conyugar a una relación entre las 3 principales recurrencias identificadas en el Pareto.
- A pesar de que pueda entenderse que el análisis de RCA pueda ser un método correctivo, siendo este su origen en la falla, su potencial de identificación del modo de fallo es la clave para su corrección.
- El no entendimiento de la concepción y diseño de activos, así como la valoración de los componentes más sencillos puede generarnos grandes fallas y consumo de recursos haciendo menos rentable el negocio.
- Hoy en día se encuentran bastas bibliotecas de modos de falla ya definidos con sus métodos y sugerencias para la normalización y mejoramiento de la fiabilidad de los activos. De nosotros depende su identificación y aplicación.

- Los proyectos de mejora a implementar a raíz de un análisis de causa raíz, son en últimas el objetivo máximo de la técnica. Migrar a rutinas e intervenciones proactivas, antes de que se generen las anomalías es la clave de la gestión de activos basada en condición.

- Queda la enseñanza de la interrelación entre los grupos de mantenimiento, ingeniería y logística para el buen desarrollo de la gestión de activos.

BIBLIOGRAFIA

ANÁLISIS DE PARETO. [En línea]. Wikipedia. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Pareto

FMEA. [En línea]. Blog de la calidad. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://blogdelacalidad.com/analisis-de-modos-de-fallas-y-efectos-fmea/>

HUNT, Cecil. Un buen mantenimiento puede prolongar la vida útil de su unidad de bombeo a balancín. Lufkin Industries, Inc. [consultado 29 de junio de 2019]. Disponible en: Centro de información técnica. Zona Industrial, El Centro Ecopetrol.

Historia de las unidades de bombeo mecánico. [Consultado: 25 de octubre de 2019]. [Consultado: 25 de junio de 2019]. <http://oil-mail.blogspot.com/2011/05/sistema-de-levantamiento-artificial-por.html>

M-640D, PUMPING UNIT, SPARE PART LIST. Lufkin Industries, Inc. [consultado 29 de junio de 2019]. Disponible en: Centro de información técnica. Zona Industrial, El Centro Ecopetrol.

Mantenimiento centrado en confiabilidad. [En línea]. Gestopolis. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.gestiopolis.com/rcm-mantenimiento-centrado-en-confiabilidad/>

OTERO, Diego., Historia de la fundación de Barrancabermeja y el papel del petróleo, UNICIENCIA 2015, P5 [En línea]

PARAMO, José. Tribología Centrada En Confiabilidad. [En línea]. [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://predictiva21.com/articulo/tribologia-centrada-en-confiabilidad/>

SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. Society of Automotive Engineers Inc., 1999. 30 p.