

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (RCA), PARA
LA ELIMINACIÓN DE UN MAL ACTOR EN EQUIPOS CRÍTICOS DE LA SOM –
ECOPETROL S.A**

HERNANDO VERA MUÑOZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (RCA), PARA
LA ELIMINACIÓN DE UN MAL ACTOR EN EQUIPOS CRÍTICOS DE LA SOM –
ECOPETROL S.A**

HERNANDO VERA MUÑOZ

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director:
ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

*Dedico este logro tan importante en mi vida a Dios, por ser mi guía
y amigo durante estos años*

A mis padres y hermanos por ser mi gran motivación

A mi tía Lílana por su apoyo incondicional

*A mis profesores que fueron parte de mi formación profesional y
personal.*

Hernando Vera Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por ser mí guía y amigo, y porque hoy me permite alcanzar uno de los logros más importantes en mi vida.

A mi tía Liliana Vera por la confianza depositada en mí.

Al ingeniero Isnardo Gonzales, director del proyecto, por su orientación, respaldo y colaboración siempre oportuna.

A Julia Rocío Vargas por su apoyo y valiosa colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Eudilson García por compartir sus experiencias y conocimientos.

A la familia Ortega Rueda, Alex, Ariel, Yilda por su apoyo y colaboración.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarme los conocimientos y el apoyo necesario para poder alcanzar este logro.

A todas aquellas personas que me acompañaron en este camino

¡Muchas Gracias!

Hernando Vera Muñoz.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO ORGANIZACIONAL	18
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES DE MARES (SOM)	18
1.2 RESEÑA HISTÓRICA DE CONFIPETROL S.A	19
1.3 CULTURA ORGANIZACIONAL	20
1.3.1 Misión.	20
1.3.2 Visión.	20
1.4 MARCO ESTRATÉGICO	21
1.5 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	22
1.6 PROCESO DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN	23
1.7 EQUIPOS COMPRESORES UBICADOS EN LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES DE MARES	26
1.8 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN COMPRESORES EN LA SOM	28
1.8.1 Descripción del Problema en Equipos Compresores.	28
1.8.2 Objetivos del Proyecto.	30
2. MARCO TEÓRICO	31
2.1 CONFIABILIDAD OPERACIONAL	31
2.1.1 Confiabilidad de Equipos.	32
2.1.2 Herramientas para la Optimización de la Confiabilidad en Equipos.	32
2.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FALLAS EN MANTENIMIENTO	35
2.2.1 Método Cuantitativo para el Análisis de Falla.	35
2.2.2 Método Cualitativo para el Análisis de Falla.	38
2.3 SISTEMA COMPRESORES	41
2.3.1 Compresores de Movimiento Alternativo ó Reciprocantes.	42
2.3.2 Delimitación de Frontera en Compresores.	43
2.3.3 Componentes del Compresor Reciprocantes.	47

3. ANÁLISIS DE DATOS SOBRE FALLAS EN COMPRESORES	50
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN	50
3.1.1 Sistema de Información Ellipse.	50
3.1.2 Datos Recolectados sobre Paradas Correctivas en Compresores.	53
3.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE FALLA CUANTITATIVO A LOS EQUIPOS COMPRESORES DE GAS.	58
3.2.1 Identificar y Definir el Sistema a Cuantificar.	58
3.2.2 Preparación de los Datos.	59
3.2.3 Calcular las Contribuciones Parciales, Totales de cada elemento y Ordenar.	59
3.2.4 Calcular Porcentajes Acumulados para Cada Elemento.	61
3.2.5 Diagrama de Pareto sobre fallas en compresores.	64
3.3 IDENTIFICACIÓN DEL MAL ACTOR	66
3.3.1 Descripción del Sistema Identificado como Mal Actor.	66
3.3.2 Diagnóstico del Problema a Analizar.	67
4. ANÁLISIS TEÓRICO-PRÁCTICO DEL PROCESO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA).	69
4.1 INFORME SOBRE FALLAS REPETITIVAS EN VENTILADORES	69
4.1.1 Términos de referencia (TOR) para ordenar el análisis	69
4.1.2 Organización del Equipo de Trabajo para el Análisis RCA .	69
4.2 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ MEDIANTE LA HERRAMIENTA ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS	71
4.2.1 Introducción al árbol lógico de fallas.	71
4.2.2 Pasos del Árbol Lógico de Fallas.	73
4.3 CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS PARA EL MAL ACTOR (FALLA REPETITIVA EN VENTILADORES) IDENTIFICADO EN LOS EQUIPOS COMPRESORES DE LA SOM	74
4.3.1 Descripción de los Eventos Presentados en los Ventiladores.	74
4.3.2 Descripción de los Modos de Falla en Ventiladores.	76
4.3.3 Planteamiento de Hipótesis de falla.	77

4.3.4 Verificar Hipótesis.	78
4.3.5 Estudio y Verificación de Causas Físicas.	80
4.3.6 Estudio y Verificación de Causas Humanas.	83
4.3.7 Estudio y Verificación de Causas Latentes.	84
5. PROPUESTA DE SEGUIMIENTO A LAS RECOMENDACIONES EMITIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LA FALLA	88
5.1 INTRODUCCIÓN	88
5.1.1 Justificación.	88
5.1.2 Proceso metodológico.	89
5.2 PLAN DE SEGUIMIENTO A LAS RECOMENDACIONES EMITIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LA FALLA.	91
6. CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFIA.	109
ANEXOS	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación Geográfica de la Superintendencia de Operaciones de Mares	18
Figura 2. Diagrama de Procesos Confipetrol S.A.	21
Figura 3. Organigrama SOM – Dependencia de Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad	22
Figura 4. Compresor de Gas Dresser Rand Doble Efecto - Campo Provincia	25
Figura 5. Áreas Fundamentales de la Confiabilidad Operacional	31
Figura 6. Herramientas de Gestión de Activos para mejorar la confiabilidad operacional.	33
Figura 7. Diagrama de Pareto	37
Figura 8. Árbol Lógico de Falla	39
Figura 9. Compresor Reciprocante de Dos Etapa.	42
Figura 10. Definición frontera de compresor por la ISO 14224.	44
Figura 11. Componentes del Compresor	49
Figura 12. Módulo MSO435 del Sistema de Información Ellipse	51
Figura 13. Diagrama de Pareto Mal Actor Estaciones Lisama, Llanito, El Centro	64
Figura 14. Diagrama de Pareto Mal Actor Estaciones Santos, Suerte y Bonanza	65
Figura 15. Ventiladores Maquina Compresora 17LP Estación Santos	67
Figura 16. Pasos Árbol Lógico de Fallas	73
Figura 17. Primer paso para la Construcción del Árbol Lógico de Fallas	74
Figura 18. Aspa de Ventilador Partidas – Compresor 17LP. Estación Suerte	75
Figura 19. Ventilador sin Aspas de una Máquina Compresora.	75
Figura 20: Tornillo de Hub Torcido. Máquina 3 Refrigerante. Estación Suerte	76
Figura 21. Modos de Falla	77
Figura 22. Hipótesis	78

Figura 23. Eje de Ventilador en buenas condiciones – Máquina 16LP Estación Suerte	79
Figura: 24. Verificación y Descarte de Hipótesis	80
Figura 25. Hipótesis de Causas Físicas	81
Figura 26. Tornillo de Hub Deteriorado.	81
Figura 27. Tornillo Recomendado por el Fabricante, Utilizado Actualmente en los Equipos Compresores de la SOM.	82
Figura 28. Verificación de Causas Humanas.	84
Figura 29. Estudio y Verificación de Causas Latentes	85
Figura: 30. Árbol Lógico de Fallas Mal Actor Ventiladores.	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los Compresores en la SOM	27
Tabla 2. Ítem Mantenible Compresores	45
Tabla 3. Modos de Falla en Compresores Según ISO 14224	46
Tabla 4. Formato para Recolección de Información Sobre Paradas.	52
Tabla 5. Detalles sobre Información de Paradas Correctivas en Compresores.	52
Tabla 6. Base de Datos Fallas Correctivas en compresores - 2009	55
Tabla 7. Cálculo de las Contribuciones Totales y Parciales del Tiempo de Mantenimiento Correctivo en las estaciones El Centro, Lisama y Llanito	60
Tabla 8. Cálculo Porcentaje de Pareto.	63
Tabla 9. Equipos que fallaron por el ítem mantenible (ventiladores) durante el año 2009.	68
Tabla 10: Descripción de Pasos para la Construcción de un Árbol Lógico de Fallas	72
Tabla 11. Recomendaciones Emitidas para la Eliminación de la Falla	87

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Formatos Registro de Actividades Tendientes a Eliminar el Mal Actor en ventiladores	112

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (RCA), PARA LA ELIMINACIÓN DE UN MAL ACTOR EN EQUIPOS CRÍTICOS DE LA SOM – ECOPETROL S.A.*

AUTOR: HERNANDO VERA MUÑOZ. **

PALABRAS CLAVES:

Análisis de Causa Raíz, Confiabilidad Operacional, Mal Actor, Árbol Lógico de Fallas, Análisis Cuantitativo.

DESCRIPCIÓN:

El siguiente proyecto es un compilado sobre las acciones desarrolladas durante el proceso de aplicación de la metodología, análisis de falla causa raíz (RCA) en los equipos compresores de gas de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM (estaciones compresoras Lisama, Centro, Llanito, Santos, Suerte y Bonanza), para la eliminación del principal mal actor identificado durante el año 2009 en estos equipos.

En el proceso de aplicación de la metodología RCA, se utilizó un análisis cuantitativo que a través del diagrama Pareto facilitó identificar el mal actor (falla repetitiva en los ventiladores), en los equipos compresores; posteriormente, un análisis cualitativo con el cual se encontraron las verdaderas causas de la falla, utilizando la herramienta del árbol lógico de fallas que mediante procedimientos lógicos permitió representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que condujeron a descubrir los eventos indeseables y/o las causas raíces que originaron la falla repetitiva en los ventiladores.

Del proceso de aplicación de la metodología RCA, surgieron recomendaciones tendientes a la eliminación definitiva de la falla en los equipos compresores con las cuales se busca que el problema no se vuelva a repetir, para estas últimas se construyó un plan de seguimiento que contiene acciones mejorativas, actividades, metas e indicadores que permiten ejercer un mayor control sobre los procedimientos sugeridos para la solución adecuada del problema presentado.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Isnardo González Jaimes.

SUMMARY

TITLE: APLICATION OF METHODOLOGY ROOT CAUSE ANALISYS (RCA), FOR THE ELIMINATION OF A BAD ACTOR IN CRITICAL SOM-ECOPETROL S.A. EQUIPMENTS*

AUTHORS: HERNANDO VERA MUÑOZ**

KEY WORDS: Root Cause Analysis, Operational Reliability, Bad Actor, Failure Tree Logic, Quantitative Analysis.

DESCRIPTION:

The next project is a compilation of the actions developed during the implementation process of the methodology, root cause failure analysis (RCA) on gas compressor equipments of the Superintendencia de Operaciones de Mares (SOM) (Lisama stations, Centro, Llanito, Santos, Suerte and Bonanza), for the elimination of the principal bad actor identified in these equipments on 2009.

In the implementation of RCA method, was used a quantitative analysis which have been obtained through Pareto Diagram that allow an easier identification of the bad actor (Repeated failure on the fans) in the compressor equipment. Then, a qualitative analysis found the real cause of failure, using the logic tree of failures by logical procedures allows us to represent graphically the relation of cause and effect that led to discover undesirable events and / or determinate the root cause of the repeated failures in fans.

Through the implementing of RCA methodology, recommendations were aimed at the eventual elimination compressor equipments failure with which it is intended that the problem doesn't happen again, so a monitoring plan have been constructed, these includes improved actions, activities, targets and indicators to exercise greater control over the suggested procedures for the best solution of the problem identified.

*Degree Work

**Faculty of Physics and Mechanical. Engineer School of Mechanical Engineer. Director: Isnardo González Jaimes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la economía globalizada requiere el desarrollo de nuevos enfoques, métodos y herramientas que permitan aumentar la competitividad y eficiencia en los procesos de producción de las grandes organizaciones, por lo tanto, se hace necesario lograr y mantener excelentes estándares de calidad en los diferentes productos y servicios ofrecidos, estándares que se mantengan a la vanguardia de los retos exigidos por aquellos mercados competitivos. De igual manera, se hace importante fortalecer los vínculos entre Universidad - Industria, articulando herramientas teórico - prácticas que ayuden a mejorar los procesos de producción, rentabilidad y optimización de costos.

En este contexto, CONFIPETROL S.A, es una empresa dedicada a la prestación de servicios de mantenimiento centrado en confiabilidad que desarrolla sus actividades de operación en diferentes zonas del país, especialmente, en la Gerencia Regional del Magdalena Medio, a su cliente estratégico ECOPETROL S.A.

El desarrollo del proceso- práctico en CONFIPETROL S.A, tuvo como propósito fundamental, implementar la metodología de análisis causa raíz (RCA) al mal actor identificado (Falla repetitiva en ventiladores) en los equipos – críticos compresores de gas de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM, durante el año 2009 para encontrar las verdaderas causas del problema y lograr una mejor optimización de los recursos destinados al área de mantenimiento.

En el primer capítulo de este documento se encuentra el marco organizacional, que presenta la ubicación geográfica de la superintendencia de operaciones de

mares SOM (estaciones compresoras Centro, Lisama, Llanito, Santos, Suerte, Bonanza), la caracterización de CONFIPETROL S.A, el proceso de compresión realizado en la SOM, la descripción del problema en equipos compresores y los objetivos del proyecto.

En el capítulo dos, se encuentra el marco teórico que describe, los lineamientos teóricos y conceptuales que orientaron el proceso práctico; confiabilidad operacional, métodos de medición de falla (Análisis cuantitativo y cualitativo) y sistema compresor.

Posteriormente, en el capítulo tres se muestra el análisis de datos sobre falla en compresores que contiene la descripción del sistema de información, la aplicación del método de falla cuantitativo (análisis pareto) y la identificación del mal actor (falla repetitiva en ventiladores). Así mismo, se presenta un cuarto capítulo que expone el análisis teórico – práctico del proceso de aplicación de la metodología de análisis causa raíz RCA (método cualitativo de análisis de fallas).

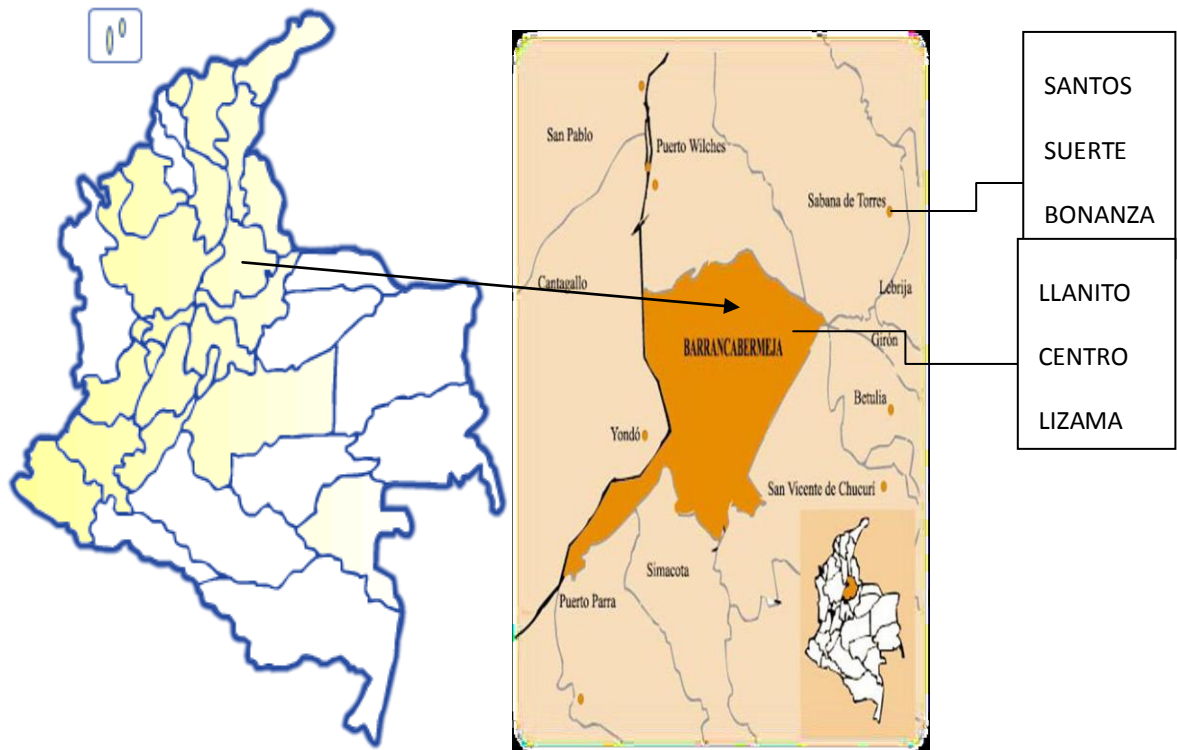
Finalmente, en el quinto capítulo se presenta una propuesta de seguimiento a las recomendaciones emitidas para la eliminación del mal actor identificado, la cual contiene introducción, justificación, proceso metodológico y estructura del plan de seguimiento propuesto.

1. MARCO ORGANIZACIONAL

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES DE MARES (SOM)

Las áreas en Colombia donde se encuentra la Superintendencia de Operaciones de Mares se representan gráficamente en la Figura 1; en la cual se muestran las zonas que se hallan en exploración y explotaciones de crudo y gas asignadas a la operación directa de ECOPETROL S.A de la Gerencia Regional Magdalena Medio.

Figura 1. Ubicación Geográfica de la Superintendencia de Operaciones de Mares



Fuente: Ecopetrol S.A. Mejoramiento de las Condiciones de los Separadores (Mecánica e Instrumentación) en las Estaciones Lizama, Llanito, Provincia y Bonanza. (Diapositivas) Barrancabermeja 2009. 15 diapositivas.

Se identifican las áreas de influencia donde opera la Superintendencia de Operaciones de Mares en Santander en las cuales presta servicios de mantenimiento y operación la empresa Confipetrol S.A; el área geográfica comprende los municipios de Barrancabermeja y Sabana de Torres. La SOM cuenta con 33 compresores de gas natural los cuales están distribuidos en 6 estaciones compresoras, en el municipio de Sabana de Torres se encuentran las estaciones compresoras Santos, Suerte y Bonanza las cuales cuentan con 24 compresores y en el municipio de Barrancabermeja están las estaciones del Centro, Llanito y Lisama con 9 compresores.

1.2 RESEÑA HISTÓRICA DE CONFIPETROL S.A

“La organización CONFIPETROL S.A nace en el año 2005 como un consorcio conformado por las empresas ST&P ING. LTDA, INEMEC LTDA, RMS LTDA y SERVICIOS ASOCIADOS LTDA”¹, la cual fue creada para llevar a cabo un contrato de mantenimiento integral para Ecopetrol S.A en la superintendencia de Operaciones del Río, Superintendencia de Operaciones de Mares y Superintendencia de Operaciones la Cira, además de otros contratos que se han desarrollado en refinería. Con el fin de aunar esfuerzos alrededor de una empresa sólida, experimentada y especializada en la prestación de servicios integrales de operación y mantenimiento se constituye el 5 de octubre de 2007 como sociedad anónima la cual en los últimos años ha obtenido un gran crecimiento, aumentando sus contratos en diferentes partes del país. La sede principal de la empresa se encuentra ubicada en el municipio de Barrancabermeja (Santander) en la carrera 23 No 72-44 del barrio La Libertad, desde allí funcionan las áreas de Gerencia General, Gerencia de Operaciones y Mantenimiento, Gestión de Recursos Humanos, Gestión de compras y contratación, Gestión de HSEQ, Gestión de Mantenimiento, Infraestructura y Tecnología, y de Gestión Financiera y Contable.

¹CONFIPETROL S.A. Agregar Valor a la Operación. (Consultado 30 de Agosto de 2010) (Disponible vía internet)<<http://www.confipetrol.com/Detalle.aspx?idDetalle=11>>

CONFIPETROL S.A. cuenta con otra oficina en la ciudad de Bogotá D.C ubicada en la carrera 15 No 98-26 piso 4 del barrio El Chicó; adicionalmente, existen oficinas para atender la parte operativa de los contratos de la empresa, las cuales se encuentran localizadas en los distintos campos donde se ejecutan los contratos, tales como El Centro, La Cira Infantas, Provincia (sabana de Torres), Casabe (Yondó), Cantagallo (Bolívar), Cocorná (Antioquia), entre otros. Asimismo, la empresa también realiza operaciones en las estaciones o plantas de Apiay (Villavicencio) y Cicuco (Bolívar) respectivamente de Ecopetrol; por lo tanto, CONFIPETROL S.A cuenta con una amplia cobertura a nivel nacional en materia de servicios de mantenimiento y operación atendiendo las necesidades de diversos sectores industriales.

1.2 CULTURA ORGANIZACIONAL

La cultura organizacional de Confipetrol S.A resume las metas a alcanzar en los próximos años y la razón de ser y existir por medio de su visión.

1.3.1 Misión. CONFIPETROL S.A. es una empresa especializada en la prestación de servicios integrales de Operación y Mantenimiento con la aplicación de técnicas de confiabilidad y predictivas de diagnóstico dirigido a los sectores industriales, Gas, Petroquímico, Petrolero, Minero y energético. Con respuesta inmediata a las necesidades de nuestros clientes, conformada por un equipo interdisciplinario altamente calificado y comprometido con la organización para la satisfacción del cliente, enfocados en la innovación y el uso adecuado de la tecnología.

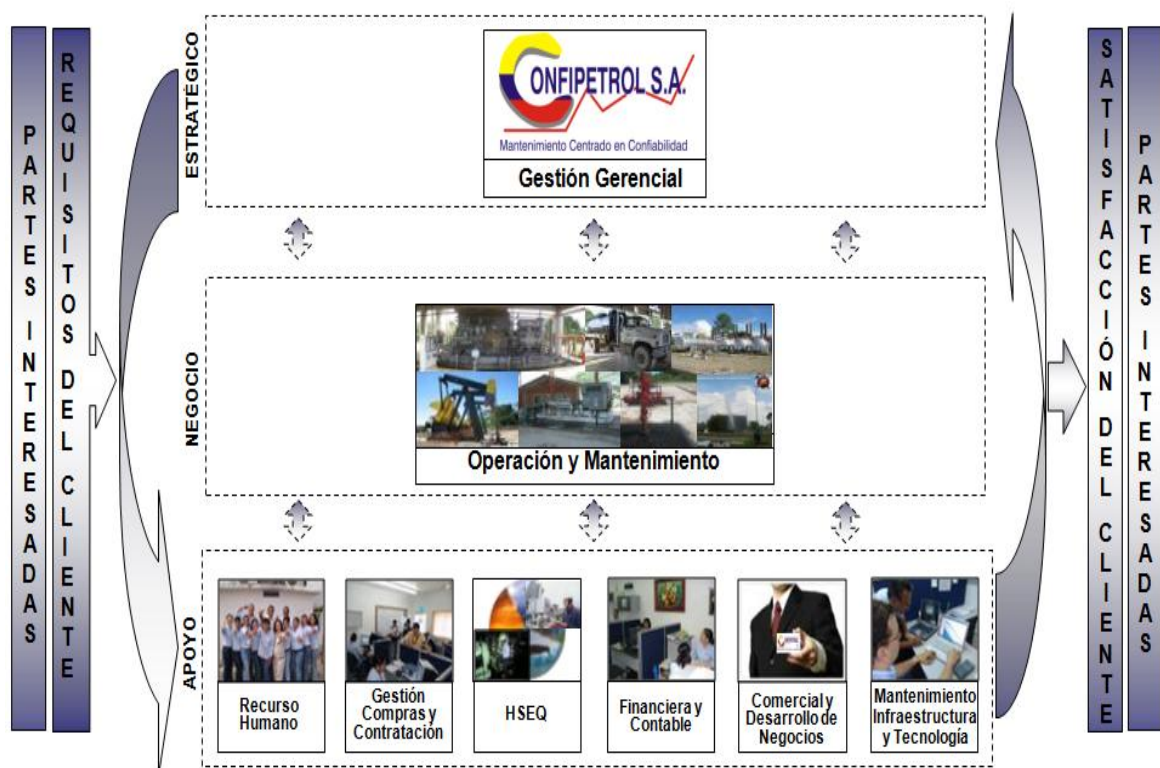
1.3.2 Visión. CONFIPETROL S.A. será reconocida a nivel nacional e internacional, como una empresa líder en operación y Mantenimiento con la aplicación de técnicas de Confiabilidad y predictivas de diagnóstico, dentro de los sectores atendidos, distinguiéndonos por la calidad y oportunidad de nuestros servicios, manteniendo una filosofía de investigación y mejoramiento continuo de

nuestros procesos, adoptando nuevas tecnologías que nos permitan seguir siendo competitivos.

1.4 MARCO ESTRATÉGICO

Confipetrol S.A. constituye un sistema abierto que a través de entradas (conocimiento/datos/partes interesadas/requisitos del cliente), desarrolla procesos internos de transformación mediante tres pilares fundamentales: el estratégico (Gestión Gerencial), el negocio basado en la operación y el mantenimiento y el apoyo conformado por el recurso humano, la gestión de compras, contratación, HSEQ, contabilidad, comercio e infraestructura y tecnología, proporcionando de esta forma unas salidas, productos o servicios (satisfacción del cliente/ partes interesadas/ mantenimiento confiable).

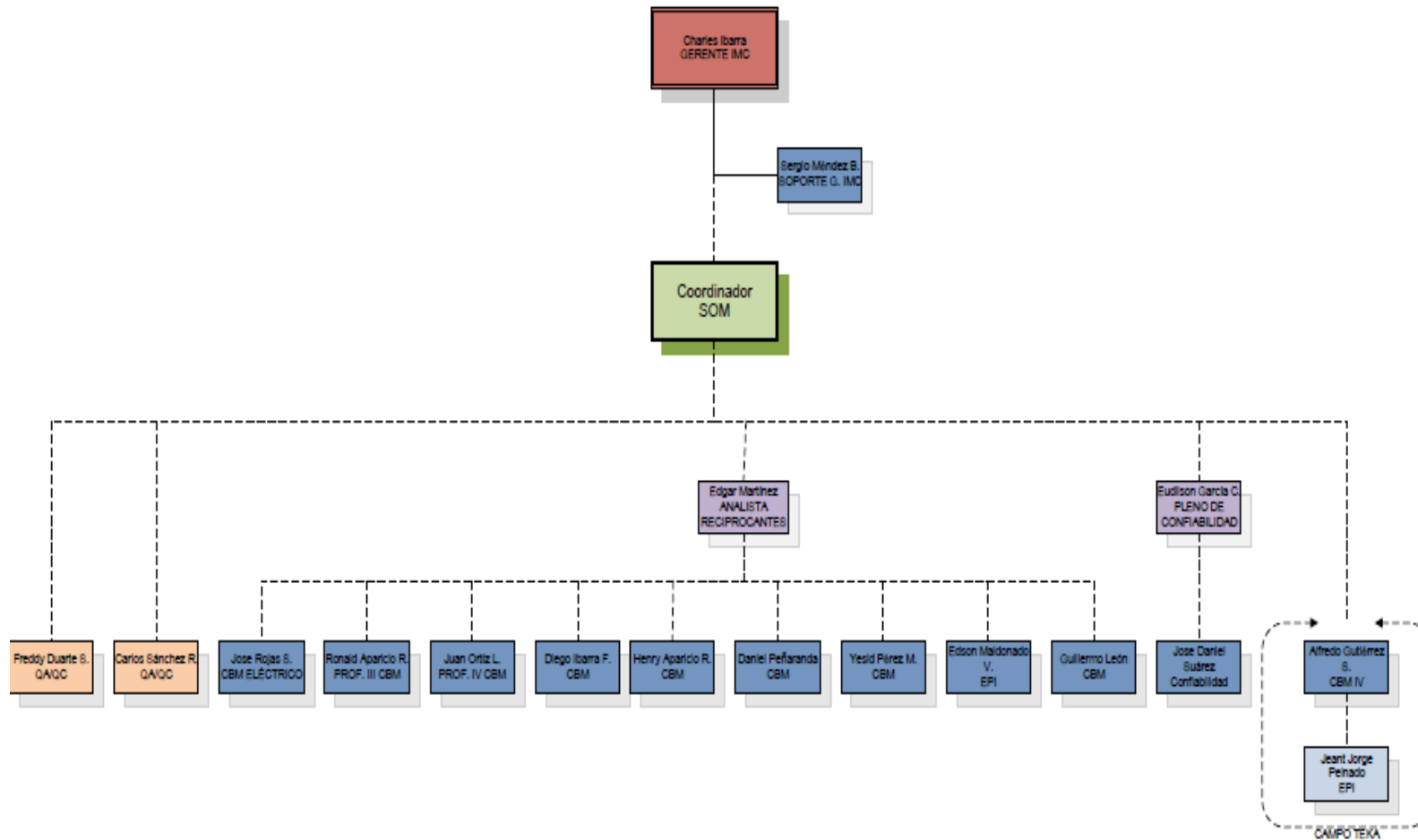
Figura 2. Diagrama de Procesos Confipetrol S.A.



Fuente: CONFIPETROL S.A. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Gestión Gerencial.2009

1.5 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

Figura 3. Organigrama SOM – Dependencia de Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad.



Fuente: CONFIPETROL S.A. Soporte IMC

La estructura organizacional de Confipetrol S.A cuenta con un grupo de ingeniería de mantenimiento y confiabilidad para la Superintendencia de Operaciones de Mares encargado del diseño y ejecución de la estrategia de mantenimiento, conformado por un gerente de confiabilidad quien a su vez tiene el manejo de un grupo de personas encargadas de desarrollar los procesos de: QA/QC (Aseguramiento de calidad), grupo análisis de vibraciones y aceites CBM (Mantenimiento basado en condición) y grupo de análisis de confiabilidad encargado de llevar los indicadores de mantenimiento.

1.6 PROCESO DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN

Para identificar los equipos compresores de gas de la Superintendencia de Operaciones de Mares como críticos, se tomo la matriz de definición de equipos críticos que se encontraba disponible en la base de datos de Ecopetrol S.A., desarrollada a partir de la metodología Ranking de criticidad de equipos, precisada en la Norma ISO 14224. “Ésta metodología está definida por 3 criterios que evacua: A. importancia, B. la confiabilidad y C. el impacto del equipo dentro del sistema”².

A. Importancia del equipo dentro del sistema

1. Puede causar riesgo en seguridad, violación ambiental.
2. Puede causar impacto económico negativo significativo. Pérdida de producción
3. Puede reducir las ratas de producción, recuperación o calidad de producción.
4. Puede causar demandas incrementadas sobre el personal operativo pero ningún impacto en seguridad, medio ambiente o producción.
5. No tiene importancia con respecto a la seguridad, medio ambiente o producción y no incrementa las demandas sobre el personal operativo.

² Informe de Criticidad de Equipos. Gerencia Regional del Magdalena Medio y Gerencia Norte. p. 9

B. Confiabilidad inherente del equipo

1. Extremadamente confiable. Normalmente no tiene partes en movimiento, servicio limpio.
2. Muy confiable. Pocas partes en movimiento, servicio ligeramente sucio.
3. Normalmente confiable. Más partes en movimiento / desgaste, servicio más severo.
4. De algún modo no confiable. Sistema complejo, servicio muy sucio, cargado fuertemente.
5. No confiable

C. Impacto del equipo en el sistema

1. Causa parada del sistema.
2. Causa reducción a largo plazo en el desempeño de un sistema. No tiene instalado equipo de respaldo. Tiempo de reparaciones o reemplazo significativo.
3. Causa reducción a corto plazo en el desempeño del sistema. Tiene instalado equipo de respaldo. Puede ser reparado rápidamente.
4. Puede operar bypassado o en manual, sin pérdida de desempeño del sistema. Se encuentra en servicio intermitente.
5. No tiene efecto en el desempeño del sistema³.

Lo anterior, permitió obtener el puntaje necesario para identificar los equipos compresores críticos.

El proceso de compresión de estos equipos se realiza de la siguiente manera: el gas que sale de pozo alimenta el compresor a una presión de 25 psi y este se utiliza para elevar la presión del gas a 1000psi al final del proceso, luego el gas es enviado a las diferentes plantas de proceso para su tratamiento y venta, y el restante se inyecta nuevamente a la formación. El compresor cuenta con un

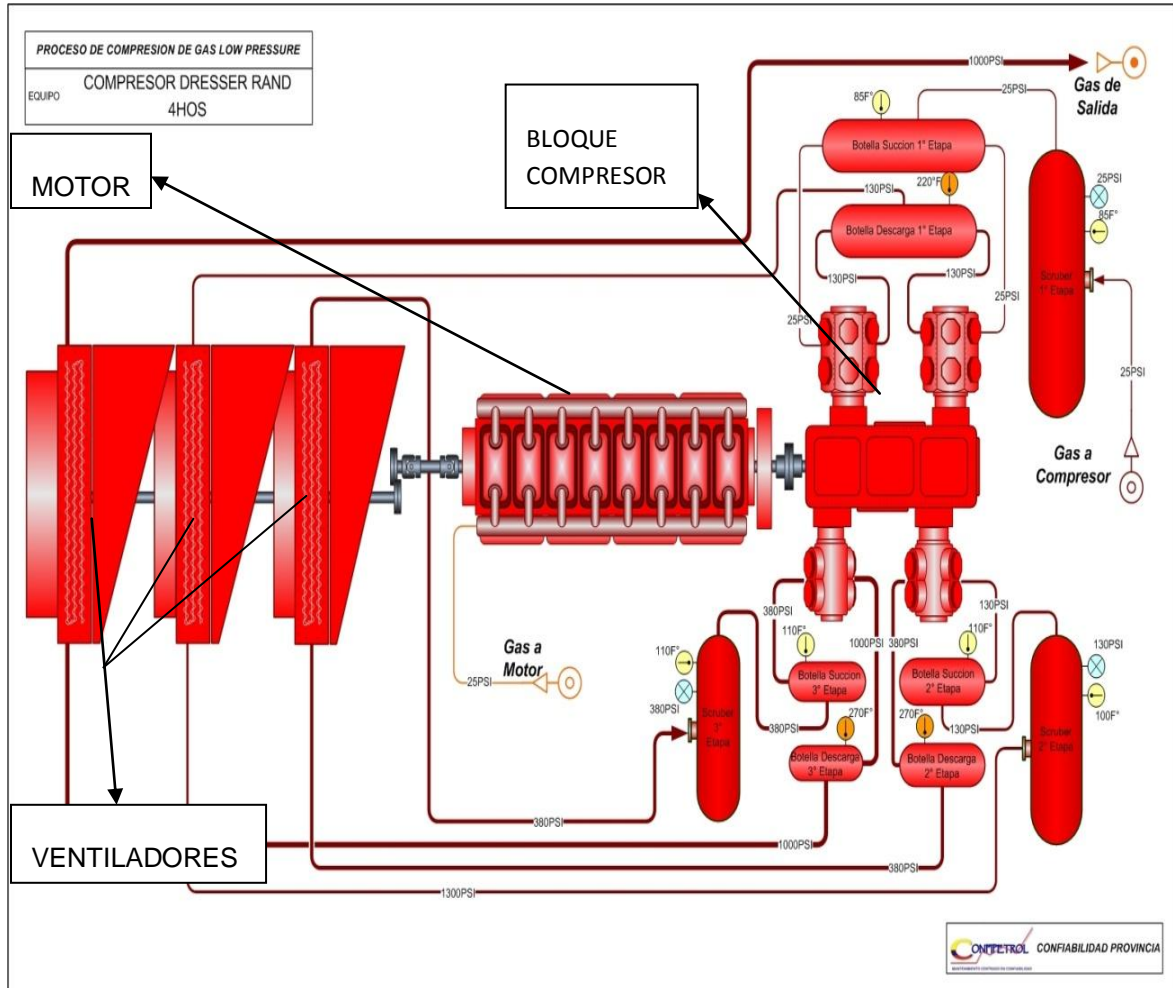
³ Ibíd; p. 9

suministro de potencia para la puesta en marcha del conjunto compresor el cual es un motor a gas que tiene una potencia de 2200 HP y que a la vez mueve por el lado opuesto al volante 3 ventiladores del sistema de enfriamiento. El compresor de la figura 4 posee tres etapas de compresión y 4 cilindros compresores en los cuales se comprime el gas mediante pistones.

El proceso que sigue el gas natural para ser comprimido es el siguiente: El gas que alimenta el compresor viene de pozo a una presión de 25 psi, pasa por un separador de líquidos (*scrubber*) que debe garantizar que solo llegue gas al compresor, luego este gas pasa a los cabezales de succión y entra a la primera etapa de compresión que está conformada por dos cilindros que trabajan en paralelo y se encargan de elevar la presión de 25psi a 130psi, luego el gas sale por la línea de descarga de la primera etapa a una mayor temperatura por la reducción de su volumen, siendo necesario pasarlo a través del enfriador o “*cooler*”. El gas a 130psi pasa nuevamente por un *scrubber* para separar los líquidos del gas que se producen durante el enfriamiento y luego pasa a la segunda etapa de compresión la cual tiene un solo cilindro, en esta etapa el gas es comprimido de 130psi a 380psi. Para completar el ciclo, el gas nuevamente pasa través del enfriador y luego pasa por el último *scrubber* para entrar en el cilindro de la última etapa el cual es el de menor diámetro que los otros 3 anteriores, en esta etapa el gas es comprimido de 380psi a 1000psi completando el ciclo para ser enviado a la planta de proceso a la nueva presión.

La figura 4 representa un compresor de gas natural constituido 3 etapas el cual se encuentra ubicado en la estación compresora Santos de la Superintendencia de Operaciones de Mares (SOM).

Figura 4. Compresor de Gas Dresser Rand Doble Efecto - Campo Provincia



Fuente: CONFIPETROL S.A.QA/QC, Campo Provincia (Sabana de Torres- Santander)

1.7 EQUIPSCOMPRESORES UBICADOS EN LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES DE MARES

La Superintendencia de Operaciones de Mares cuenta con 6 estaciones compresoras Suerte, Santos, Bonanza, Lizama, Llanito y El Centro. El objetivo de estas estaciones de compresión es elevar la presión del gas natural para luego ser enviado a plantas de tratamiento o de nuevo hacer inyección a la formación como forma de recuperación secundaria en los campos ya envejecidos. Las estaciones compresoras están compuestas por 33 compresores de diferentes capacidades,

marcas y edades, para identificar estos equipos en la tabla 1 se especifica para cada compresor la estación a la cual pertenece y sus características más importantes.

Tabla 1. Características de los Compresores en la SOM

ESTACIÓN	COMPRESOR	DESCRIPCIÓN	ETAPAS
SANTOS	1LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SANTOS	3LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SANTOS	4LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SANTOS	5LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SANTOS	7LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SANTOS	8LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SANTOS	9LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SANTOS	11LP	Compresor 4HOS Gas Baja Presión 25 PSI Motor CAT 3608	3
SANTOS	12LP	Compresor 4HOS Gas Baja Presión 25 PSI Motor CAT 3608	3
BONANZA	1LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
BONANZA	2LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SUERTE	1GL	Motocompresor IR 12SVG <i>Gas Lift</i> (Gas a pozo)	1
SUERTE	2GL	Motocompresor IR 12SVG <i>Gas Lift</i> (Gas a pozo)	1
SUERTE	3GL	Motocompresor IR 12SVG <i>Gas Lift</i> (Gas a pozo)	1
SUERTE	4GL	Motocompresor IR 12SVG <i>Gas Lift</i> (Gas a pozo)	1
SUERTE	2RF	Motocompresor IR 12SVG Gas Refrigerante	2
SUERTE	3RF	Motocompresor IR 12SVG Gas Refrigerante	2
SUERTE	8LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SUERTE	10LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SUERTE	12LP	Compresor 4RDS Gas Baja Presión 25 PSI Motor 399	3
SUERTE	13LP	Motocompresor IR 12SVG Gas Baja Presión 25 PSI	3
SUERTE	16LP	Compresor 4HOS Gas Baja Presión 25 PSI Motor CAT 3608	3

SUERTE	17LP	Compresor 4HOS Gas Baja Presión 25 PSI Motor CAT 3608	3
SUERTE	18LP	Compresor 4HOS Gas Baja Presión 25 PSI Motor CAT 3608	3
CENTRO	K1	Motor Superior 16G825Compresor <i>Worthington</i> OF6XH6	3
CENTRO	K2	Motor Superior 16G825Compresor <i>Worthington</i> OF6XH6	3
LLANITO	1LLAN	Compresor Ajax DP600	3
LLANITO	2LLAN	Compresor Ajax DP600	3
LIZAMA	3LIS	Compresor Superior MW64	3
LIZAMA	4LIS	Compresor Superior MW64	3
LIZAMA	5LIS	Compresor Superior MW64	3
LIZAMA	6LIS	Compresor Superior MW64	3
LIZAMA	7LIS	Compresor Superior MW64	3

Fuente: Confipetrol S.A - Ficha Técnica Compresores.

Los equipos compresores anteriormente mencionados deben estar el mayor tiempo disponibles para su operación, por lo tanto diariamente es llevado a cabo el control de las horas de operación, horas fuera de servicio por paradas correctivas o programadas y cuando están como respaldo de otro compresor (*Stand By*). Los datos recolectados en un determinado periodo de tiempo pueden ser analizados para solucionar los principales problemas que afectan el rendimiento de los compresores por fallas repetitivas mejorando el proceso de compresión.

1.8 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN COMPRESORES EN LA SOM

1.8.1 Descripción del Problema en Equipos Compresores. La empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A. requiere el desarrollo de procesos altamente calificados para mejorar su competitividad en los mercados internacionales, por lo tanto estrategias de mantenimiento desarrolladas por

empresas prestadoras de servicios como CONFIPETROL S.A⁴ le permitirá alcanzar una mayor confiabilidad en los equipos utilizados para la extracción de crudo y gas. Confipetrol S.A utiliza el proceso de análisis Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para asegurar que los equipos que tiene a cargo continúen desarrollando las funciones que los usuarios desean que estos hagan dentro de su contexto operativo, una de las formas de mejorar el proceso de extracción de gas es utilizando un estudio de análisis de fallas y eliminación de malos actores* por medio de la metodología análisis de causa raíz(RCA) en los equipos críticos compresores de gas de las estaciones de la Superintendencia de Operaciones de Mares (SOM), ya que disminuyendo las fallas frecuentes o repetitivas el costo de la extracción del petróleo y gas disminuiría permitiendo mayores ganancias a la empresa y se mejorara la eficiencia de ejecución en los trabajos de mantenimiento.

Un análisis preliminar de las diferentes fallas que se presentan en los equipos críticos (Compresores de gas) de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM de Ecopetrol S.A en el 2009 refleja que las fallas repetitivas causan grandes pérdidas a la empresa debido a los amplios tiempos de indisponibilidad de estos equipos, uso continuo de horas hombre atendiéndolos y perdidas de producción, este proyecto busca utilizar herramientas teórico- prácticas de confiabilidad, que permitan encontrar la solución al principal mal actor presentado durante el año 2009 en los compresores de gas, aplicando la metodología análisis de causa raíz (RCA), metodología que permitirá localizar las verdaderas causas de la falla para llegar recomendaciones que solucionar de forma definitiva el mal actor.

⁴CONFIPETROL S.A. (Consultado 30 de Agosto de 2010) (Disponible vía internet) <<http://www.confipetrol.com>>

*Falla repetitiva causante de la mayoría de problemas de mantenimiento

1.8.2 Objetivos del Proyecto.

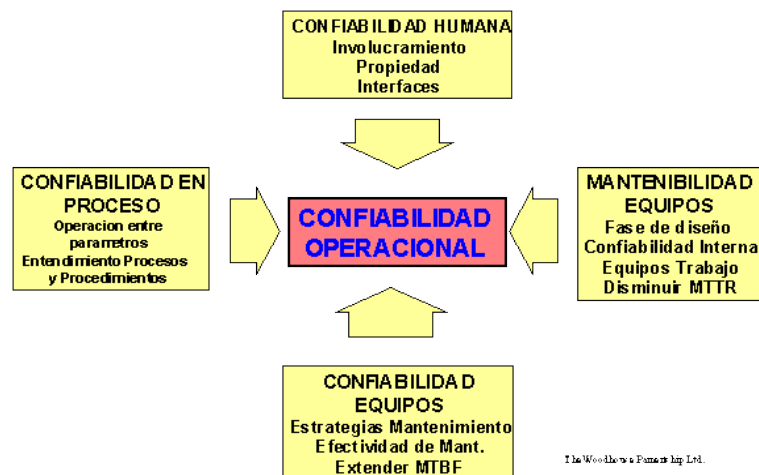
- Elaborar y analizar los diagramas de Pareto que muestran las fallas más frecuentes en los compresores de la SOM – ECOPEPETROL S.A, identificando la principal falla presentada durante el año 2009.
- Implementar la metodología de análisis de causa raíz al mal actor identificado, utilizando herramientas estratégicas de confiabilidad que permitan mejorar los procesos de producción, mantenibilidad y seguridad de los equipos.
- Socializar conclusiones, recomendaciones al grupo de ingeniería de confiabilidad Ecopetrol S.A, para gestionar su compromiso en la implementación de acciones tendientes a la eliminación del mal actor o falla repetitiva.
- Proponer un sistema de seguimiento a las recomendaciones emitidas para la eliminación de la falla, que involucre la participación activa del personal de operación y mantenimiento.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONFIABILIDAD OPERACIONAL

La confiabilidad operacional incluye procesos de mejoramiento continuo mediante la incorporación sistemática de nuevas tecnologías, técnicas de análisis y herramientas de diagnóstico para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial priorizando las actividades y la proacción humana, basados en la visión, la misión y los objetivos de la organización. Para lograr un total control de la producción se debe garantizar confiabilidad operacional en sus cuatro áreas fundamentales; confiabilidad en proceso mediante una integridad operativa, confiabilidad humana través de las competencias y el entrenamiento, confiabilidad de diseño la cual incluye la mantenibilidad y por último la confiabilidad de equipos que se vale de estrategias de mantenimiento para aumentar disponibilidad de plantas y equipos (Ver Figura 5).

Figura 5. Áreas Fundamentales de la Confiabilidad Operacional



Fuente: Confiabilidad Operacional es Parte Vital en el Aseguramiento de la Productividad. (Consultado el día 30 de Septiembre de 2010)(Disponible Vía Internet) http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/reliability/confiabilidadoperacional.htm

La confiabilidad de equipos es una de las principales áreas de la confiabilidad operacional para mejorar y lograr los resultados de mejora continua en procesos, usando técnicas de mantenimiento que mejoran la disponibilidad de los equipos mediante el análisis de probabilidad de falla, capacidad de las partes, componentes, equipos y subsistemas permitiendo de esta manera que los equipos cumplan con la función y desempeño para lo cual fueron diseñados evitando fallas y periodos largos de baja productividad, prediciendo fallas por medios estadísticos y analizando las condiciones de uso, así como su mantenibilidad, seguridad y nivel de calidad.

2.1.1 Confiabilidad de Equipos⁵. Una de las maneras para maximizar la confiabilidad operacional de los activos en su contexto operacional es a partir de la determinación de los requerimientos reales de mantenimiento logrando la optimización de costos mediante diferentes técnicas, herramientas y filosofías de mantenimiento que ayudan a identificar sistemáticamente que debe hacerse para garantizar que los activos físicos continúen haciendo lo que requiere el usuario en el contexto operacional actual. En términos generales permite distribuir en forma efectiva los recursos asignados a la gestión de mantenimiento tomando en cuenta la importancia de los activos en el contexto operacional y los posibles efectos y consecuencias de los modos de falla de estos activos sobre la seguridad el ambiente y las operaciones.

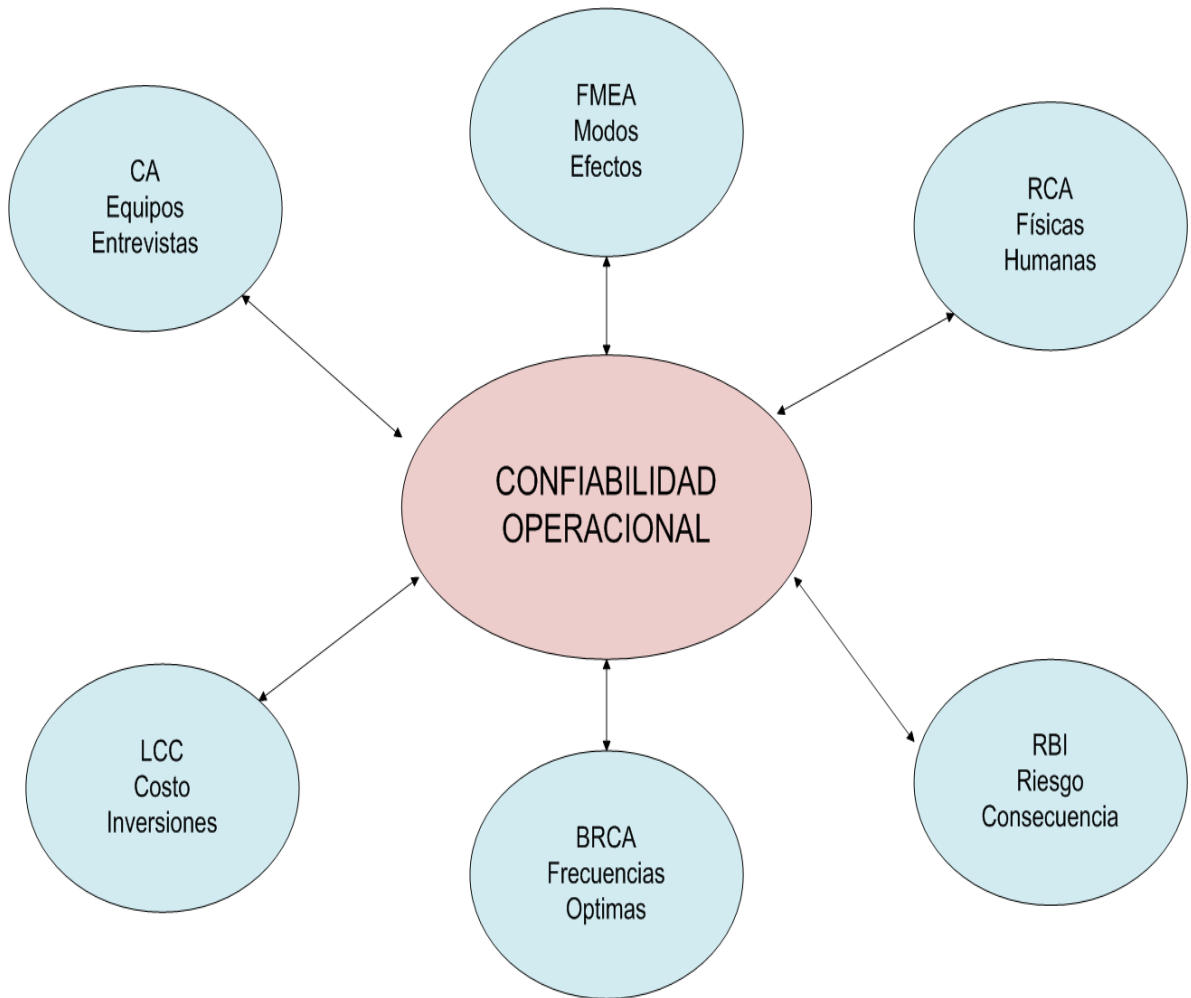
2.1.2 Herramientas para la Optimización de la Confiabilidad en Equipos. Las principales herramientas que se utilizan para la gestión de activos las cuales contribuyen a la confiabilidad de los equipos son las siguientes:

- El Análisis de Criticidad (CA); es una técnica que permite jerarquizar instalaciones, sistemas y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones.

⁵GARCÍA PALENCIA, Oliverio. Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad. (Consultado el día 30 de Septiembre) (Disponible Vía Internet) <[http:// confiabilidad. net/articulos/ gestión-integral-de-mantenimiento-basada-en- confiabilidad/](http://confiabilidad.net/articulos/gestión-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/)>

- El Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA); es una metodología que permite determinar los modos de falla de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan.

Figura 6. Herramientas de Gestión de Activos para mejorar la confiabilidad operacional.



Fuente: Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad (Consultado el día 30 de Septiembre) (Disponible Vía Internet) (<http://confiabilidad.net/articulos/gestión-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>).

- La Inspección Basada en Riesgos (RBI); es la técnica que permite definir la probabilidad de falla de un sistema, y las consecuencias que las fallas pueden generar sobre la gente, el proceso y el entorno.

- El Análisis Costo - Riesgo - Beneficio (BRCA); es una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos de realizar una actividad y los beneficios generados, con base en el valor del riesgo que involucra la realización, o no, de tal acción.
- El Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC); es una técnica que permite elegir entre opciones de inversión o acciones de mejora de la confiabilidad con base en su efecto en el costo total del ciclo de vida de un activo nuevo o en servicio.
- El Análisis Causa Raíz (RCFA); es un procedimiento sistemático que se aplica con el objetivo de precisar las causas que originan las fallas, sus impactos y sus frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas⁶.

El RCA es el mejor exponente de estas técnicas que combinado con los métodos de medición de fallas cuantitativo basado en los análisis estadísticos, se convierten en una herramienta poderosa para la eliminación de malos actores buscando una manera rápida y eficaz a la solución de problemas cotidianos y evitar repetición de eventos mayores, con la eliminación de los defectos de una falla repetitiva (mal actor) se lograra obtener una mayor confiabilidad integral del proceso de producción por reducción en el número de averías, también se optimizara el volumen de trabajo al reducir las actividades reactivas, aumentando de esta forma la eficiencia en los procesos de ejecución, razones por las cuales usar esta metodología de confiabilidad permitirá mejorar la confiabilidad operacional, con participación activa del personal de empresa optimizando de los recursos destinados al departamento de mantenimiento.

⁶ _____ Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad. (Consultado el día 30 de Septiembre) (Disponible Vía Internet) <[http:// confiabilidad. net/articulos/ gestión-integral-de-mantenimiento-basada-en- confiabilidad/](http://confiabilidad.net/articulos/gestión-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/)>

2.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FALLAS EN MANTENIMIENTO

Los análisis cuantitativos y cualitativos son un conjunto de procedimientos para extraer los datos de una investigación con los cuales se obtiene la información necesaria para realizar una completa interpretación de su significado, los datos que se recogen en los análisis de falla cualitativos y cuantitativos son aquellos que se refieren a los fenómenos estudiados o que se piensan estudiar. Ante un determinado problema, se plantean hipótesis, se observa, se toman datos, se registra y se someten a un análisis. En el análisis de falla un dato es la representación simbólica (numérica, alfabética, alfanumérica) de una falla bajo una forma conveniente para ser usado como base para hacer inferencias y tomar decisiones.

Estos métodos son las herramientas de los investigadores, el medio para acercarse, o entender lo que está ocurriendo. Los métodos inductivos están generalmente asociados con la investigación cualitativa, mientras que el método deductivo está asociado con la investigación cuantitativa. Los análisis cuantitativos y cualitativos en mantenimiento pretenden extraer de los datos la máxima información y significado para conocer lo que hay y sucede para poder explicar y comprender la razón de un problema. En la metodología cualitativa se trata de identificar los característicos de los fenómenos, su sistema de relación y su estructura dinámica, mientras que con la estructura cuantitativa estudia la relación entre variables cuantificadas, su fuerza de asociación, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede explicando porque las cosas suceden de una forma determinada.

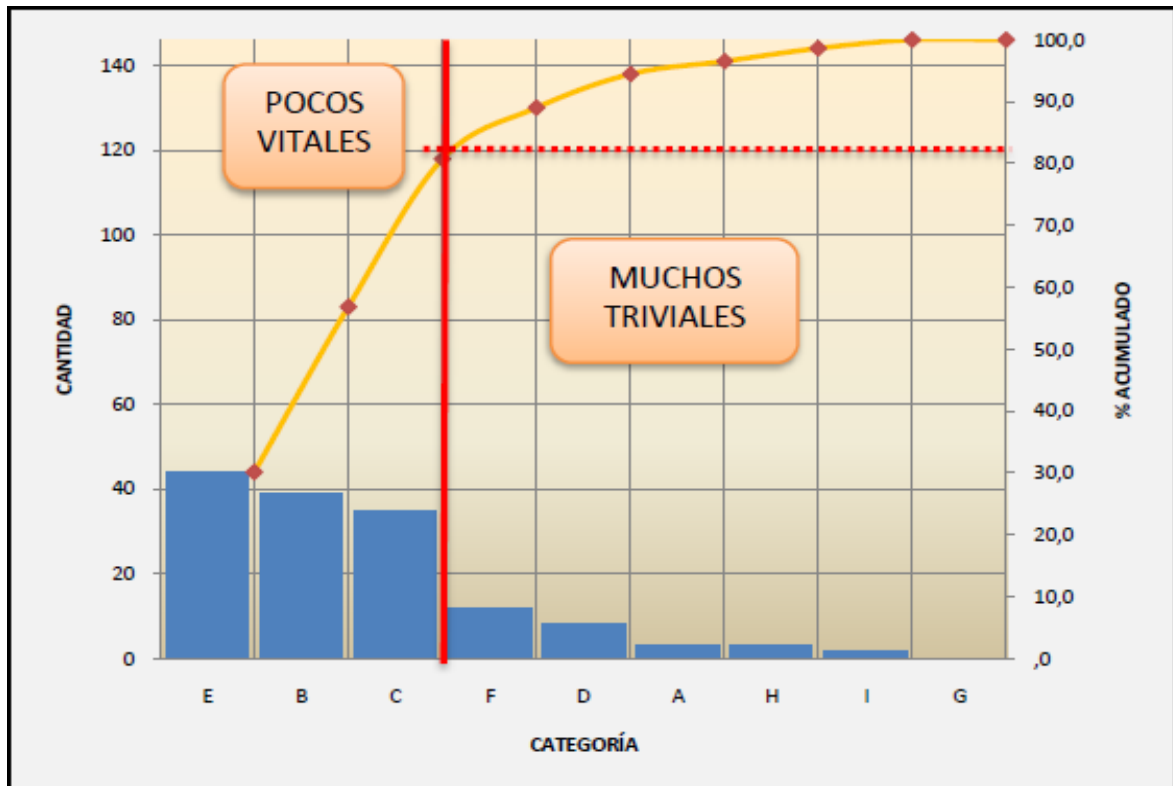
2.2.1 Método Cuantitativo para el Análisis de Falla. Los métodos cuantitativos para el análisis de falla se basan en el estudio de la estadística e indicadores asociados al proceso evaluado, siendo usual el empleo de modelos matemáticos rigurosos y de gráficas para la presentación y análisis de los datos. Su fundamento

esta en encontrar la probabilidad de que ocurra una falla y pronosticar que puede suceder en el futuro para tomar decisiones, es decir expresar en términos probabilísticos las fallas de los equipos, esto se realiza por medio de los registros históricos de los procesos, sistemas y equipos.

2.2.1.1 Análisis Pareto. El análisis pareto o análisis ABC es una herramienta avanzada genérica de mantenimiento para identificar y jerarquizar datos, con el fin de mostrar que elementos componen el tema que se está analizando. Este permite mediante una representación gráfica o tabular, conocida como diagrama de pareto, identificar en una forma decreciente los aspectos que se presentan con mayor frecuencia o que tienen una ponderación o incidencia mayor. Aplicando el análisis de pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia, mediante la aplicación del principio de pareto (pocos vitales, muchos triviales) conocido también como la regla 80/20 que dice que hay muchos problemas sin importancia (80% de los problemas) frente solo a unos graves (20% de los problemas). Si se logra determinar cuáles son esos factores vitales se puede concentrar recursos en el estudio de los mismos con lo que se resuelve la mayoría de los problemas consiguiendo la máxima eficacia y rendimiento de los recursos dedicados, logrando con el análisis de pareto separar los “pocos vitales” de los “muchos triviales”. La grafica donde se organizan las diversas clasificaciones de datos es el diagrama de pareto, que representan los elementos o factores constituyentes de un problema o tema analizado, por orden descendente de izquierda a derecha por medio de barras sencillas o por una línea continua que une los puntos después de haber reunido los datos para calificar las categorías, de modo que se pueda asignar un orden de prioridad.

El diagrama permite identificar visualmente en una revisión las minorías de características vitales a las que es importante prestar mayor atención y de esta manera priorizar recursos para llevar a cabo una acción correctiva sin malgastar esfuerzos y tiempo.

Figura 7. Diagrama de Pareto



Fuente: MONCADA, Davian Augusto *et al.* Seminario de Investigación en Metodologías de Análisis de Fallas .Bucaramanga, 2009.

2.2.1.2 Objetivos del Análisis de Pareto. El análisis de Pareto es una herramienta estadística de mantenimiento muy utilizada para la identificación de problemas crónicos y su aplicación solo está limitada por el ingenio del analista, realizarlo tiene como objetivo:

- Identificar oportunidades para llevar a cabo mejoras.
- Identificar los sistemas, equipos o elementos que están causando la mayoría de problemas a mantenimiento y producción.
- Analizar las diferentes agrupaciones de datos
- Buscar las causas principales de los problemas y establecer la prioridad de las soluciones.

- Evaluar los resultados de los cambios efectuados a un proceso (antes y después).
- Expresar los costos que significan cada tipo de falla y los ahorros logrados mediante el efecto correctivo llevado a cabo a través de determinadas acciones⁷.

2.2.2 Método Cualitativo para el Análisis de Falla. Los métodos cualitativos para el análisis de falla, se aplican en la ingeniería de mantenimiento para encontrar las causas que originan las fallas en procesos, sistemas o equipos mediante técnicas de observación y verificación, entrevistas no estructuradas, lluvias de ideas, entre otras. Estos métodos cualitativos son sistemáticos, lógicos y cada uno tiene un procedimiento claro a seguir para encontrar las causas que originaron la falla.

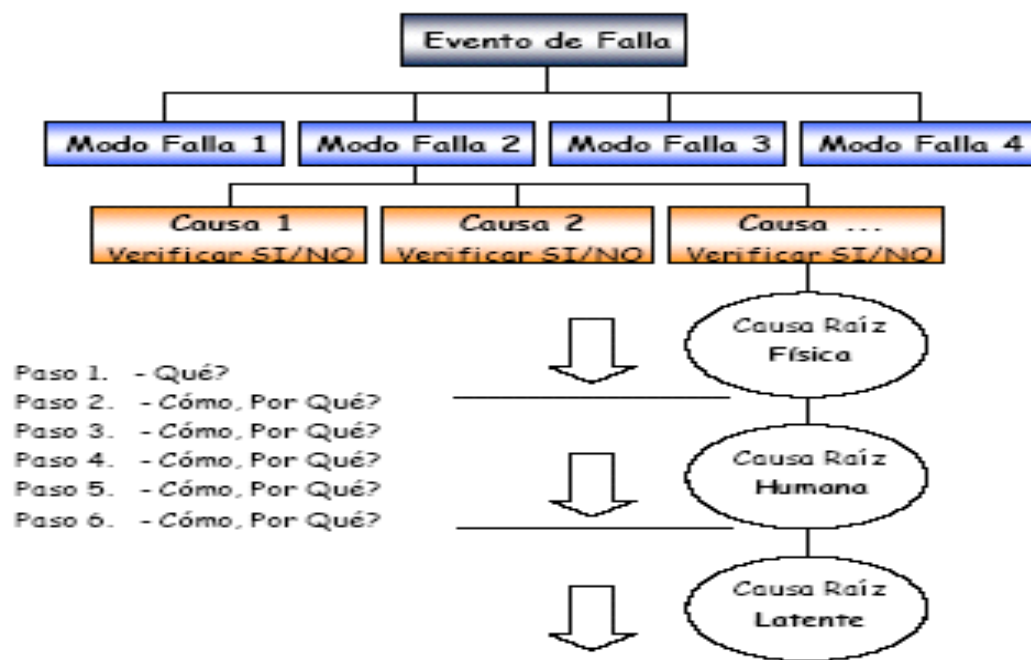
2.2.2.1 Análisis de Causa Raíz. El análisis de causa raíz (RCA) es un método cualitativo de análisis de falla que utiliza la lógica sistemática para lograr identificar las causas responsables de una falla. También permite identificar la mejor solución para corregir la causa identificada y como realizar su seguimiento, esta metodología se basa en el árbol lógico de falla(Ver Figura 8), la deducción y verificación de los hechos para encontrar el origen de una falla, permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.

Por su estructura, el RCA es un proceso que consume recursos y una gran cantidad de tiempo por lo tanto se debe establecer desde un principio si el problema requiere realizar o no un estudio de RCA. Con el fin de saber si una falla requiere de un RCA, se debe evaluar basado en sus consecuencias, por ejemplo: fallas que involucren la integridad de las personas, las inversiones o infraestructura, los equipos o la combinación de varias o todas las anteriores. El

⁷ MONCADA, Davian Augusto *et al.* Seminario de Investigación en Metodologías de Análisis de Fallas. Bucaramanga, 2009, 317 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas. Área de Mantenimiento.

objetivo es determinar el origen de las causas físicas, humanas y latentes de una falla, la frecuencia con que apareció y el impacto que genera, por medio de un estudio minucioso de los factores, circunstancias y diferentes elementos que podrían mitigar o eliminar por completo la falla una vez tomadas las acciones correctivas que sugiera el análisis mejorando la seguridad, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos de la organización.

Figura 8. Árbol Lógico de Falla



Fuente: ECOPEPETROL S.A. Manual para la Aplicación de la Metodología de Análisis de Causa Raíz para la Solución de Problemas. p.39

Para hacer un buen análisis de causa raíz, se debe ir más allá de los componentes físicos de la falla o raíces físicas y analizar las acciones humanas que desataron la cadena de causa-efecto que llevo a la causa física, lo cual implica analizar por qué hicieron esto, si se debió a procedimientos incorrectos, especificaciones equivocadas o a falta de capacitación, lo cual puede sacar a la

luz raíces latentes, es decir deficiencias en el gerenciamiento, que de no corregirse, pueden hacer que la falla se repita nuevamente.

2.2.2.2 Aplicación del Análisis Causa Raíz. En la aplicación del análisis de causa raíz consta de cuatro etapas básicas que se definirán a continuación.

1. **Definición del problema:** Esta etapa consiste en identificar cual es el problema o situación que se desea solucionar, en este punto se decide la aplicación de la herramienta ACR en busca de mejoras para el funcionamiento de los equipos o erradicar problemas complejos
2. **Análisis del problema:** Costa del análisis preliminar y el desarrollo en pleno de la herramienta y definición de los pasos para la aplicación del RCA, los cuales son:
 - Recolectar datos de la falla
 - Ordenar el análisis(equipo multidisciplinario)
 - Analizar los datos (El equipo toma cada pieza del rompecabeza y la pone en su lugar)
3. **Identificar soluciones efectivas:** Esta etapa está ligada a los hallazgos y conclusiones obtenidas a lo largo de la aplicación del análisis causa raíz al problema estudiado, donde ya localizadas las causas de fondo se identifican las correcciones que se deberían realizar para asegurar la no ocurrencia del fallo.
4. **Implementar soluciones:** Cuando se realizan las correcciones propuestas a eliminar la falla, basadas en el plan de seguimiento propuesto a las recomendaciones emitidas en el informe RCA.

2.2.2.3 Niveles del Análisis de Causa Raíz. Para solucionar definitivamente un problema se debe llegar a la verdadera causa que lo está generando; es por esto que el análisis de causa tiene tres niveles de posibles causas.

- *Causa Raíz Física:* Reúne toda las situaciones o manifestaciones de origen físico que afectan directamente la continuidad operativa de los

equipos o planta. En este nivel no se encontrara la causa raíz de la falla, sino un punto de partida para localizarla.

- *Causa Raíz Humanas*: Aquí se encuentran todos los errores cometidos por el factor humano y que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla, esta es una de las categorías en la que se podía encontrar la causa raíz.
- *Causa Raíz Latente*: Todos aquellos problemas que aunque nunca hayan ocurrido son factibles su ocurrencia, entre ellos: falta de procedimiento para arranque o fuera de servicio, personal de mantenimiento sin capacitación, inapropiados procedimientos de operación entre otros⁸.

2.3 SISTEMA COMPRESORES

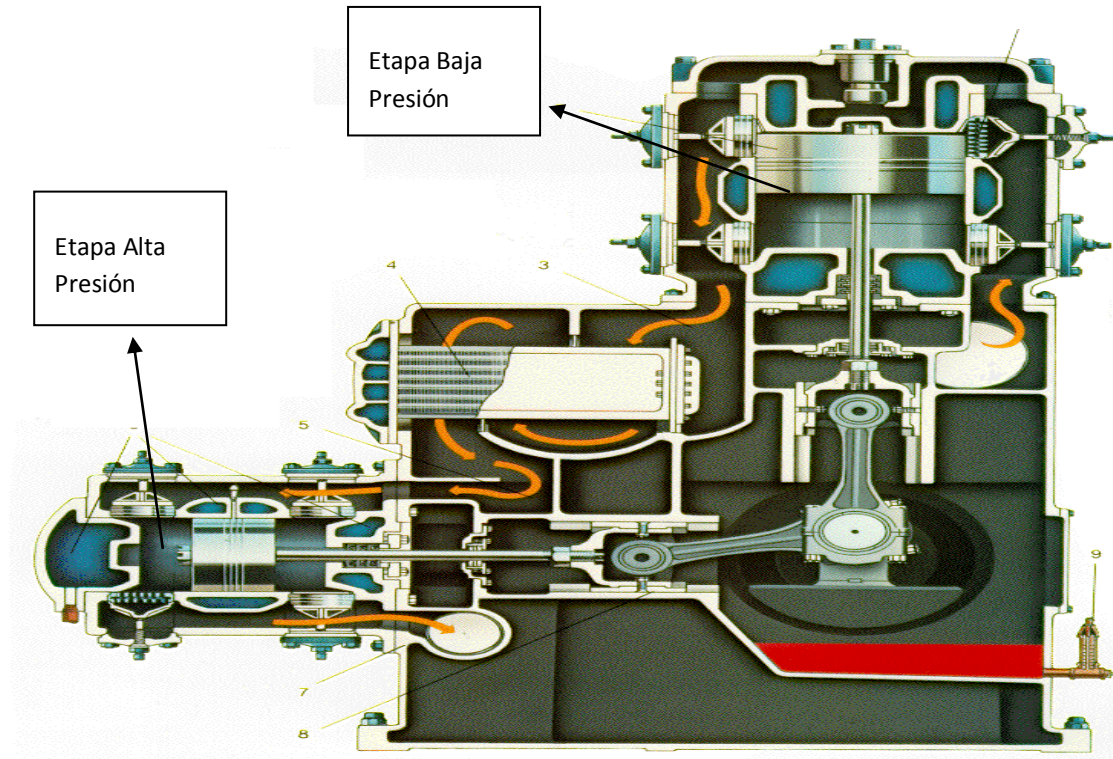
La industria petrolera utiliza sistemas de compresores para diferentes tipos de aplicaciones. Uno de los principales usos de los compresores reciprocantes en los campos petroleros donde se extrae gas natural, es comprimir el gas natural a presión más alta para transportarlo por tuberías y posterior acumulación, almacenaje o procesamiento, este gas también es utilizado para la inyección dentro de pozo con el objetivo de empujar el petróleo o el agua a la superficie siendo este un método de levantamiento artificial de crudo, manteniendo una presión optima dentro del pozo.

Para comprender el rol del compresor en el procesamiento de gas se hace preciso explicar los compresores de desplazamiento positivo y su funcionamiento. Un compresor se define como un mecanismo accionado por una fuerza motriz para elevar la presión de un gas sobre el cual actúa realizando un trabajo. Los compresores se fabrican en diversos tamaños y diseños para satisfacer las necesidades y exigencias de aplicaciones industriales, comerciales y domesticas. Los compresores utilizados para comprimir gas natural son los de

⁸ LATINO. Robert J. Root Cause Analysis. 2 ed. CRC Press LLC, Virginia. 2002. p.103

desplazamiento positivo o recíprocos (Ver Figura 9) los cuales aumentan la presión directamente por reducción del volumen de la cámara que encierra el gas.

Figura 9. Compresor Reciprocante de Dos Etapa.



Fuente: ECOPELROL S.A. Manual de Operación de Compresores. p.17

2.3.1 Compresores de Movimiento Alternativo ó Recíprocos. Llamados de pistón ó recíprocos es uno de los tipos de compresores más comunes. Las unidades más pequeñas son en su mayoría de efecto simple, es decir, el pistón efectúa solamente una carrera de aspiración y una de compresión por cada revolución del cigüeñal. La disposición del pistón, biela, cigüeñal y cárter es similar a la de un motor de gasolina. “Las unidades mayores son generalmente de doble acción ya que el pistón posee dos caras disponibles para comprimir, realiza dos veces más trabajo por revolución del cigüeñal, ejecutando dos carreras de

aspiración y dos de compresión”⁹. Cada cilindro del compresor tiene por lo menos una válvula de admisión y una de descarga para controlar la entrada y la salida del gas. Estas válvulas son del tipo automático que se abren y se cierran a modo de cheque al producirse inversiones de presión a través de ellas.

Según la posición de los cilindros los compresores de pistón se clasifican a su vez en:

- Horizontales. Los cilindros están en un plano horizontal.
- Verticales. Los cilindros están en un plano vertical.
- Opuestos. Los cilindros están colocados en relación de 180°.
- Angulares. Los cilindros van en ángulo con respecto al eje de unidad.

Según su diseño operacional los compresores pueden ser de:

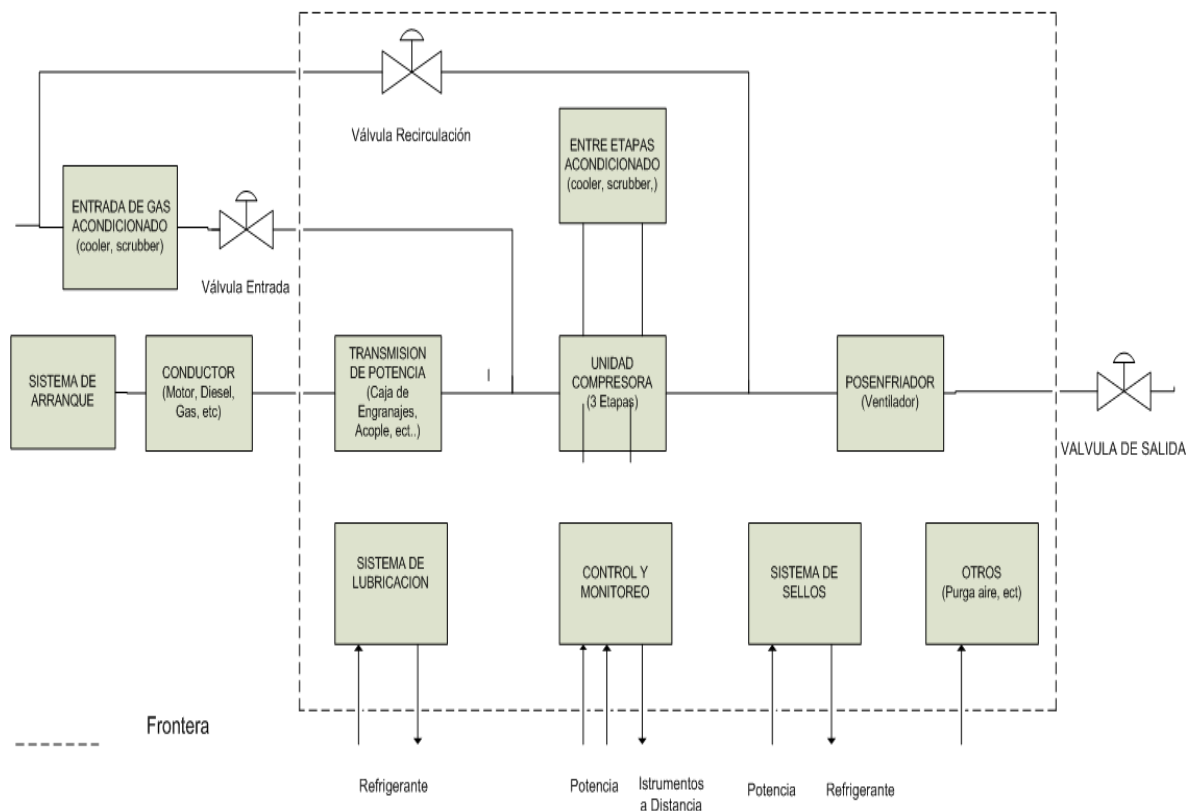
- Acción Sencilla. La compresión se realiza en un solo extremo del cilindro.
- Acción Doble. La compresión se realiza en ambos extremos del cilindro.
- Una Etapa. Cuando la presión de descarga se alcanza en una sola etapa.
- Dos o más Etapas. Cuando la presión de descarga se logra en dos ó más etapas de compresión.

2.3.2 Delimitación de Frontera en Compresores. La estándar ISO 14224 ofrece información sobre los equipos utilizados en la industria petrolera, para los compresores de gas esta norma ilustra los diferentes sistemas que lo conforman y las partes o componentes que poseen los diferentes sistemas. Esta norma delimita las subunidades que conforman el equipo en sistema de enfriamiento, sistema de lubricación y sistema de control, con el fin de reducir y ordenar las definiciones para describir las unidades, así como comprimir los códigos utilizados para describir las falla presentadas en estos equipos. El propósito de dividir en forma clara las fronteras para los compresores es garantizar la recolección y

⁹COLOMBIA. ECOPETROL S.A. Manual de Operación de Compresores. Cuarta Edición. Barrancabermeja – Santander. Junio 1997. p.16

concentración de datos sobre fallas para posteriormente realizar los análisis de confiabilidad y mejorar la comunicación entre operadores y el grupo de mantenimiento. El registro de eventos indeseables con los cuales se realizara los análisis de falla y posterior identificación de problemas en los compresores por falla repetitivas en sus partes que lo conforman, será facilitado delimitando las diferentes subunidades que conforman el compresor y a su vez los respectivos ítem mantenibles que conforman las subunidades.

Figura 10. Definición frontera de compresor por la ISO 14224.



Fuente: Norma ISO 14224. p.62

2.3.2.1 Ítem Mantenible¹⁰. Ítem constituye una parte, o un conjunto de partes que es normalmente el menor nivel al cual un equipo puede ser desarmado sin que

¹⁰INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Petroleum and Natural Gas Industries: - Collection and Exchange of Reliability and Maintenance data for Equipment. ISO, 2005, 15: il. (ISO 14224)

se le cause daño, para el sistema compresor la ISO 14224 fija los ítem mantenible para los compresores reciprocantes de las diferentes subunidades con el fin de resumir las partes del compresor a las cuales se le va a llevar control en las paradas y los posibles daños fallos que puedan ocurrir (Ver Tabla 2)

Tabla 2. Ítem Mantenible Compresores

CLASE DE EQUIPO	COMPRESOR					
SUB UNIDAD	TRANSMISIÓN DE POTENCIA	COMPRESOR	CONTROL Y MONITOREO	SISTEMA DE LUBRICACION	SISTEMA DE SELLO DEL EJE	OTROS
ITEM MANTENIBLE/ COMPONENTE	Cojinetes.	Tuberías internas.	Control de accionamiento	Bomba	Sello mecánico	Válvulas de retención
	Acople al conductor.	Sellos.	Dispositivo control de Válvulas	Motor	Reservorio.	Refrigerador o cooler
	Acople a la unidad conducida.	Cojinete radial.	Control de suministro de potencia interna.	Válvulas de retención	Bomba	Purga de aire.
	Correas	Cojinete axial.		Refrigeradores	Motor	Sistema de control magnético
		Juntas del eje.		Filtros	Engranaje.	
		Controlador		Tubería	Filtros de aceite lubricante	Juntas de bridas.
		Pistón.		Válvulas de paso de aceite lubricante	Válvulas	Cooler
		Bujes de cilindros.			Sello aceite.	Ventilador
		Válvulas compresora		Depósito de aceite con sistema de enfriamiento	Sello mecánico.	
		Empaque			Scrubber	
					Deposito de aceite	

Fuente: Norma ISO 14224. p.63

2.3.2.2 Modos de Falla. Los modos de falla es la descripción de los eventos que causan la pérdida de la función de un componente, forma genérica como se produce la falla. La estándar ISO 14224 tiene determinado muchos de los modos de falla para los compresores de gas en la industria petrolera estos son utilizados para describir la falla como es observadas refiriéndose a los efectos que esta produce.

Tabla 3. Modos de Falla en Compresores Según ISO 14224

MODOS DE FALLA			EQUIPO	
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TRADUCCIÓN	COMPRESOR DE GAS	MOTOR DE COMBUSTIÓN
FTS	FAIL TO STAR ON DEMAND	FALLA DE ARRANQUE	X	X
STP	FAIL TO STOP ON DEMAD	FALLA EN LA PARADA	X	X
VIB	VIBRATION	VIBRACIÓN	X	X
BRD	BREAKDOWN	RUPTURA	X	X
HIO	HIGH OUTPUT	SALIDA ALTA	X	X
OHE	OVERHEATING	SOBRECALENTAMIENTO	X	X
NOI	NOISE	RUIDO	X	X
STD	STRUCTURAL DEFICIENDY	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	X	X
INL	INTERNAL LEAKAGE	PASE INTERNO	X	X
OVH	OVERHAUL	MANTENIMIENTO MAYOR	X	X
PDE	PARAMETER DEVIATION	DESVIACION DE PARAMETROS(P,T, F, Q)	X	X
FOU	FOULING	ENSUCIAMIENTO	X	X
EOP	ERRATIC OPERATION (FLUCTUATION)	OPERACIÓN ERRÁTICA (FLUCTUACIÓN)	X	X
ALK	LEAKAGE ON AUXILIARY SYSTEMS	FUGA EN SISTEMAS AUXILIARES	X	X
OTH	OTHER	OTROS	X	X

Fuente: Norma ISO 14224.p.161

2.3.3 Componentes del Compresor Reciprocantes. Los componentes típicos que componen el sistema compresor alternativo que están fuera de su frontera incluyen:

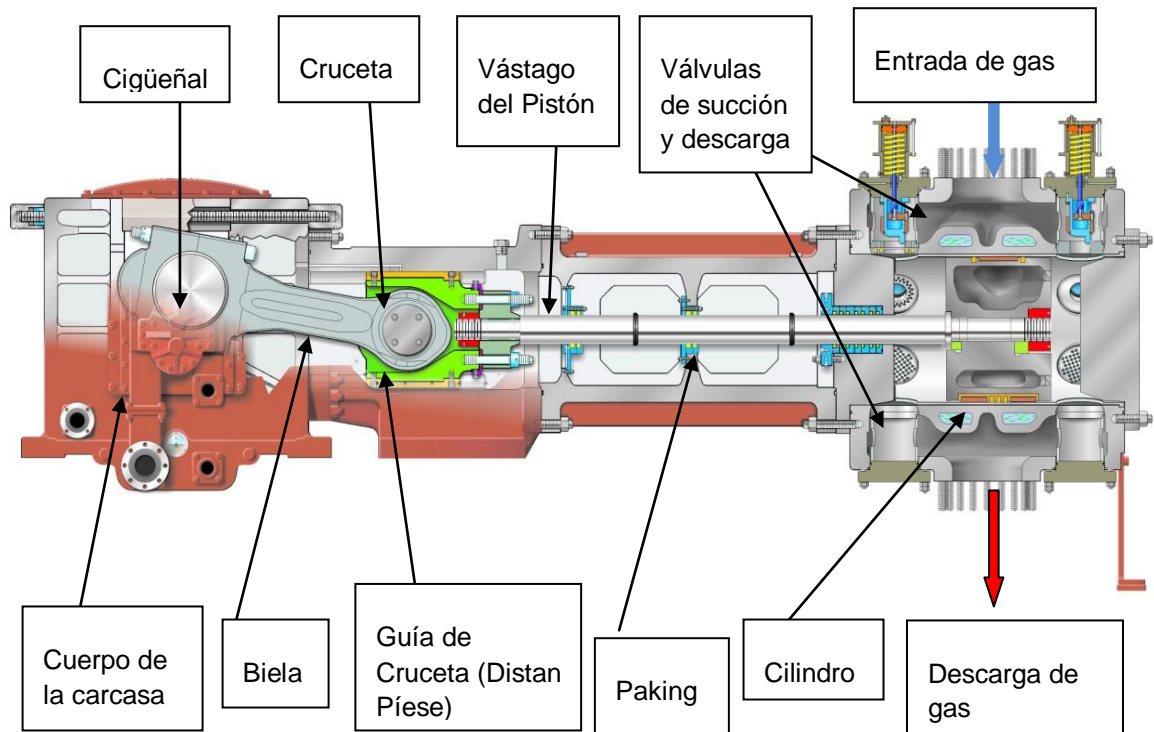
- Los separadores o scrubber que eliminan los líquidos libres antes de que el gas entre en el compresor, esta función es importante para preservar la vida útil de las válvulas y otros componentes del sistema.
- Sistema de Arranque el cual ayuda al motor de combustión interna a que venza la inercia para poder arrancar.
- El impulsor que es un motor de combustión interna el cual brinda la energía rotativa al cigüeñal del compresor, la combinación del balanceo del impulsor y el compresor es una consideración crítica sobre el diseño del sistema.
- Cooler en el cual el gas es enfriado después de ser comprimido para nuevamente comprimir.
- Ventiladores: Es un elemento que hace parte del cooler conformado por aspas que hacen circular el aire para que por medio de un proceso de convección el agua utilizada para extraer el calor de los cilindros compresores enfrié nuevamente.

El compresor que realiza el trabajo sobre el gas es el corazón del sistema, el cual transforma la energía rotativa en energía alternativa que comprime el gas, a continuación se describen las partes más importantes de la unidad compresora que están dentro de su frontera.

- **Cigüeñal:** Es el que trasmite el movimiento rotativo a las bielas, está compuesto por uno o más pasadores de cigüeñal (bulón de cruceta) donde conectan las bielas los cuales están en una cantidad pareja para mantener el balance en el compresor y posicionados a lo largo del cigüeñal, esta construida con aleación de acero de considerable resistencia mecánica.

- **Biela:** Convierte la energía rotativa del cigüeñal en energía alternativa lineal en cada carrera del compresor, esta pieza es de acero forjado y conecta el vástago del pistón al cigüeñal por medio de la cruceta.
- **Cruceta:** La cual viaja en las guías de la cruceta y conectan la biela con el vástago del pistón.
- **Paking:** Está compuesto por una serie de aros que envuelven al vástago del pistón, este brindan un sello entre la guía de la cruceta y el cilindro a medida que el vástago del pistón va y viene en cada ciclo, dando un sello óptimo de acuerdo a las presiones, tipos de gases y la ubicación de los aros dentro del Paking.
- **Pistón:** Es el encargado de comprimir el gas en la cámara del cilindro está conectado al extremo del vástago, generalmente son hechos de aleación de aluminio y su forma es cilíndrica.
- **Cilindro:** Cámara donde se comprime el gas, tiene la superficie nitrurada para obtener dureza y resistencia al desgaste.
- **Válvulas de Succión y Descarga:** Controlan el flujo de gas que entra y sale del cilindro con cada revolución del cigüeñal y por consiguiente con cada ciclo del pistón. Cada válvula abre y cierra hasta 1800 veces por minutos estos componentes deben aguantar retorcimiento, vibraciones y el impacto de cierre y apertura continuo por esto el diseño es crítico para asegurar un rendimiento óptimo y brindar una confiabilidad excelente para condiciones de operación descritas.

Figura 11. Componentes del Compresor



Fuente: OVALLE. Víctor. Experiencia y Tecnología; Soluciones Reciprocantes para Requerimientos del Siglo 21. (Diapositivas). 86 diapositivas.

3. ANÁLISIS DE DATOS SOBRE FALLAS EN COMPRESORES

Para el análisis de la información sobre las fallas en los equipos compresores de gas en la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM, se utilizó el programa de mantenimiento Mincom Ellipse versión 5.2.3.5, que permitió organizar los datos sobre las paradas de equipos suministrados por el personal de operación y mantenimiento.

Los datos obtenidos fueron analizados inicialmente, mediante la aplicación del método de medición de falla cuantitativo, con el cual se identificó el mal actor presentado durante el año 2009 en los compresores.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN

3.1.1 Sistema de Información Ellipse. La herramienta Mincom Ellipse versión 5.2.3.5 es el CMMS (Computerized Maintenance Management System) sistema computarizado para la gestión de mantenimiento oficial utilizado por toda la organización (Ecopetrol S.A) para la gestión de mantenimiento; su manejo permite el desarrollo de actividades de planeación, control y análisis de mantenimiento.

Así mismo, el sistema de información se encuentra integrado por módulos de trabajo que cumplen diversas funciones en el registro y control de las actividades de mantenimiento. El MSO435 es el módulo utilizado para el registro, cálculo y posterior análisis de los datos de tiempos de parada de los equipos a través de la herramienta oficial (Ver figura 12); el cargue de información es realizado diariamente por el supervisor de mantenimiento de Confipetrol S.A encargado de los equipos (Compresores).

Figura 12. Módulo MSO435 del Sistema de Información Ellipse

	Estado Operacional Compon.	Descripción	Hora Inicio	Hora Final	Tiempo Total	Orden Trabajo	Código de Comp.	Posición Comp.	Comentario	Acció
1	TMCO	CORRECTIVO	12:00	04:00	16.00	MT074053				
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										

Fuente: Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A.

La información registrada es utilizada para llevar el seguimiento de la gestión de los programas de mantenimiento que realiza la empresa Confipetrol S.A, también utilizando el historial de fallas se determinan los problemas crónicos que afectan los compresores por medio del análisis de la estadística del ítem mantenible que más fallo y el modo de falla repetitivo.

Aplicando el método de medición de falla cuantitativo se encontraron las fallas crónicas que afectaron la producción de gas y por ende la de petróleo en el año 2009 y las bases para tomar acciones correctivas que mejoren el funcionamiento de los compresores, optimizando de esta manera el proceso de producción de gas. La información sobre las paradas se registra diariamente en el CMMS con la siguiente información.

Tabla 4. Formato para Recolección de Información Sobre Paradas.

FECHA	EQUIPO	TOP	TSB	T. PROG	TMCO	DESCRIPCION PARADA	MODO DE FALLA	ITEM MANTENIBLE

Fuente: CONFIPETROL S.A. Grupo de confiabilidad.

Cada ítem de información anterior es importante para hacer un análisis acertado de las diferentes fallas que afectan los equipos, fallas crónicas o repetitivas que son identificadas al final de cada año.

Las especificaciones de los datos tomados son las siguientes:

Tabla 5. Detalles sobre Información de Paradas Correctivas en Compresores.

ITEM	ABREVIACIÓN	DESCRIPCIÓN ITEM
Fecha		Día, mes, mes año en que ocurrió el evento.
Equipo		Identificación (TAG) del equipo.
Tempo de Operación	TOP	Es el tiempo durante el cual el equipo o unidad productiva está operando.
Tiempo en Mantenimiento Correctivo	TMCO	Se utiliza cuando en el equipo o unidad productiva se realiza un mantenimiento de tipo no programado (no preventivo, no predictivo o no Mejorativa) por fallas imprevistas presentadas que ocasionaron la pérdida total de su capacidad.
Tiempo en Stand By	TSB	Tiempo durante el cual el equipo o unidad productiva está disponible y ha sido asignada para que actúe como relevo de otro acuerdo a políticas de mantenimiento o condiciones operacionales.

Tiempo Programado	T. PROG	Se utiliza cuando el equipo no se encuentra operando debido a causas operacionales que han sido previstas o plenamente programadas, Como los mantenimientos preventivos, predictivos y mejorativos.
Descripción Parada		Descripción del operador como percibe la falla
Modo de Falla		Forma o manera genérica como se produce la falla, se refiere al efecto que produce la falla observada
Item Mantenible		Constituye una parte, o un conjunto de partes que es normalmente el menor nivel al cual un equipo puede ser desarmado sin que se le cause daño.

Fuente: CONFIPETROL S.A. Grupo de Confiabilidad

3.1.2 Datos Recolectados sobre Paradas Correctivas en Compresores. La información sobre paradas de equipos compresores de las estaciones compresoras de la Superintendencia de Operaciones de Mares, Lisama, Llanito, El Centro, Santos, Suerte y Bonanza y los problemas que las originaron se registraron diariamente en el CMMS oficial mediante el control de horas de funcionamiento de los 33 compresores de gas que existen. Los datos que se registraron fueron validados por los operadores que de turno en cada equipo compresor.

Cuando las paradas son correctivas se hace una descripción del ¿por qué? determinado compresor dejó de funcionar; esta primera descripción es realizada por el operador de turno que identifica inicialmente la ocurrencia de la falla, luego se investigan su modo de falla y el respectivo ítem mantenible que fallo; de esta manera, se lleva una estadística de datos completa basada en hechos que permitirán realizar un análisis certero sobre los problemas que afectan los equipos compresores.

La información sobre las paradas correctivas es la que posteriormente se utilizara para hacer el análisis cuantitativo de falla e identificar las principales fallas que

afectan el proceso de compresión. Luego se realizara el diagrama de pareto con el cual se identifica el 20% de las fallas que causaron el 80% de los problemas. A la falla identificada con el análisis cuantitativo (pareto) se aplicara la metodología análisis de causa raíz (RCA) para conocer y eliminar las verdaderas causas que la originaron.

La tabla 6 representa un modelo de evidencia de la forma como se recolectaron los datos de las paradas correctivas en las diferentes estaciones compresoras de la SOM durante el año 2009. Los datos incluidos dentro de la misma, son una muestra representativa que sólo muestra una parte del total de la información recolectada.

Tabla 6. Base de Datos Fallas Correctivas en compresores - 2009

FECHA CALENDARIO	EQUIPO	TOP	STB	T. PROG	T.MCO.	Parada correctivas	DESCRIPCIÓN	MODO DE FALLA	ITEM MANTENIBLE
01-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS DEL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
01-Oct-09	COMP 2 ELC	15,5	0	0	8,5	1	EQUIPO FUERA DE SERVICIO (CAUSA ALTA PRESION EN 2DA ETAPA, SE REVISÓ CC N° 1 DE 3RA ETAPA Y SE ENCONTRARON LOS ANILLOS EN MAL ESTADO, PENDIENTE SU CAMBIO.	Alta presión en segunda etapa	ANILLOS DE DESGASTE
01-Oct-09	COMP 4 LIS	13	0	0	11	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA CAMBIO DE TERMOCUPLA EN EL CILINDRO DE FUERZA 7R.	Fuga por termocupla	CILINDRO
02-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS DEL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
02-Oct-09	COMP 2 ELC	6	0	0	18	0	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA ALTA PRESION EN 2DA ETAPA, SE REVISÓ CC N° 1 DE 3RA ETAPA Y SE ENCONTRARON LOS ANILLOS EN MAL ESTADO, PENDIENTE SU CAMBIO.	Alta presión en segunda etapa	ANILLOS DE DESGASTE
02-Oct-09	COMP 3 LIS	3,5	16	0	4,5	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA CORRECCION DE FUGAS DE ACEITE)	Fuga de aceite	SISTEMA DE LUBRICACIÓN
02-Oct-09	COMP 4 LIS	16,5	0	0	7,5	0	EQUIPO ESTA COMO AUXILIAR (CAUSA MTTO AL ENFRIADOR Y TERMCUPLAS)	Fuga por termocupla	CILINDRO
03-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS DEL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
03-Oct-09	COMP 4 LIS	18	0	0	6	0	EQUIPO ESTA COMO AUXILIAR (CAUSA REPARACION DE LA VALVULA DE SEGURIDAD DEL CCN°1 DE TERCERA ETAPA POEQUE SE DISPARO)	Falla cilindro compresor tercera etapa	VÁLVULAS
04-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR

04-Oct-09	COMP 4 LIS	9	0	0	15	0	EQUIPO ESTA COMO AUXILIAR (CAUSA REPARACION DE LA VALVULA DE SEGURIDAD DEL CCNº1 DE TERCERA ETAPA POEQUE SE DISPARO)	Falla cilindro compresor tercera etapa	VÁLVULAS
05-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
05-Oct-09	COMP 3 LIS	13	10	0	1	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL(CAUSA ALTA PRESION EN SUCCION PRIMERA ETAPA)	Alta presión de succión	VALVULA DE SUCCION
05-Oct-09	COMP 4 LIS	10	8	0	6	0	EQUIPO ESTA COMO AUXILIAR (CAUSA MTTO AL COOLER)	Mantenimiento preventivo	COOLER
05-Oct-09	COMP 5 LIS	23	0	0	1	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL(CAUSA ALTA PRESION EN SUCCION PRIMERA ETAPA)	Alta presión de succión	VALVULA DE SUCCION
05-Oct-09	COMP 6 LIS	23	0	0	1	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL(CAUSA ALTA PRESION EN SUCCION PRIMERA ETAPA)	Alta presión de succión	VALVULA DE SUCCION
05-Oct-09	COMP 2 LLAN	22	0	0	2	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL(CAUSA FALLA EN EL FLUIDO ELECTRICO)	Falla flujo eléctrico	FLUJO ELÉCTRICO
06-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
06-Oct-09	COMP 2 ELC	21,5	0	0	2,5	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA PRESENTO ALTA TEMPERATURA LA BANCADA #2 DEL MOTOR INSTRUMENTISTAS ENCONTRARON FALLA EN EL CABLE DE LA RTD SE CORRIGIO, EL EQUIPO QUEDO EN LINEA	Alta temperatura en bancada	BANCADA
06-Oct-09	COMP 3 LIS	22	0	0	2	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PRESENTO ALTA TEMPERATURA AGUA DE ENFRIAMIENTO)	Alta temperatura de agua de enfriamiento	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
07-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)EN PROCESO DE DE COMPRA	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
07-Oct-09	COMP 3 LIS	0	0	0	24	1	EQUIPO FUERA DE SERVICIO (DAÑO EN EL HUB DE LA POLEA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE LAS CORREAS DEL VENTILADOR). ESTA POR CUENTA DE MATALMECANICA DE LAS 13:00 HORAS	Daño sistema de transmisión	SISTEMA DE TRANSMISIÓN

08-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)EN PROCESO DE DE COMPRA	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
08-Oct-09	COMP 3 LIS	0	0	0	24	1	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(PENDIENTE CAMBIO DE HUB POLEA CONDUCTORA TRANSMISIÓN DE LAS CORREAS DEL VENTILADOR)	Daño sistema de transmisión	SISTEMA DE TRANSMISIÓN
08-Oct-09	COMP 4 LIS	14	0	0	10	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA ALTA TEMPERATURA EN TERCERA ETAPA SE REVISARON VALVULAS Y SE CAMBIARON LOS ANILLOS)	Alta temperatura tercera etapa	ANILLOS DE DESGASTE
08-Oct-09	COMP 1 LLAN	0	11	0	13	1	EQUIPO SE ENCUENTRA DISPONIBLE(SE LE CAMBIO EL NIPLEE DE 1" CILINDRO COMPRESOR N° 1)	Niple cilindro compresor uno	CILINDRO
09-Oct-09	COMP 1 ELC	0	0	0	24	0	EQUIPO FUERA DE SERVICIO(CAUSA PARTIÓ LAS ASPAS EL VENTILADOR)EN PROCESO DE DE COMPRA	Partió Aspas del ventilador	VENTILADOR
09-Oct-09	COMP 2 ELC	23	0	0	3	0	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAUSA SE PARO POR ALTA PRESION DE SEGUNDA ETAPA)	Alta presión de segunda etapa	VALVULA DE SUCCION
09-Oct-09	COMP 3 LIS	8	0	0	16	1	EQUIPO EN OPERACIÓN NORMAL (CAMBIO DE HUB DE LA POLEA CONDUCTORA TRASMISION DE CORREAS DEL VENTILADOR)	Daño sistema de transmisión	CORREAS DE TRANSMISIÓN

Fuente: CONFIPETROL S.A. Grupo de Confiabilidad

3.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE FALLA CUANTITATIVO A LOS EQUIPOS COMPRESORES DE GAS.

El esfuerzo de efectuar la recolección de información sobre paradas de los equipos compresores, se refleja en la identificación de los problemas que causan más pérdidas durante un tiempo determinado en los compresores, proceso realizado por medio del análisis de los datos recopilados. Con la información estadística sobre paradas correctivas se procede a la construcción del diagrama de Pareto con el fin de identificar las fallas repetitivas que perjudicaron el proceso de compresión de gas; al realizar el diagrama se debe seguir un procedimiento de construcción adecuado con el fin de identificar los problemas que causaron las mayores pérdidas. A continuación, se describen los pasos realizados para la identificación de los malos actores en equipos compresores recíprocos correspondientes al año 2009.

3.2.1 Identificar y Definir el Sistema a Cuantificar. Consiste en identificar y definir el sistema, equipo, falla o características a analizar, además de las categorías o elementos que lo componen y las unidades de medida.

- Un efecto cuantificado y medible sobre el que se priorizara; para el caso de los equipos compresores de la SOM se tuvo en cuenta el tiempo en horas de mantenimiento correctivo (TMCO) el cual tiene una relación directa con el costo de pérdida por producción, reparación y lucro cesante, además los datos fueron tomados diariamente con información verificada.
- Una lista completa de elementos o factores que contribuyen a dicho efecto como puede ser: modos de falla, pasos de un proceso, ítem mantenible o tipos de problema. El ítem mantenible fue la forma de identificar los malos actores ya que los datos recolectados comprendieron los diferentes componentes que conforman el compresor que fallaron ocasionando paradas correctivas.

3.2.2 Preparación de los Datos. Como en todas las herramientas de análisis de datos, el primer paso consiste en recoger los datos correctos o asegurar que los que existen son de calidad, para esto es necesario:

- Definir el origen de los datos (históricos o retrospectivos), los datos sobre falla de compresores fueron históricos ya que la información sobre los problemas de las paradas correctivas se registraron diariamente en la base de datos habilitada correspondiente al año 2009.
- Decidir sobre el tamaño de la muestra (hasta que fecha incluir los datos históricos), el tamaño de la muestra utilizada para el proceso desarrollado fue la correspondiente al año(2009) por que al terminar un año se necesita saber cuáles son las fallas crónicas correspondientes al periodo terminado para posteriormente realizar acciones mejorativas.
- Verificar la valides de los datos históricos sobre control de paradas que se registra en la base de datos. El seguimiento de las paradas se realizo diariamente verificando la información suministrada por el personal de operaciones de turno. Los datos estuvieron basados en hechos donde se especificaban el modo de falla del evento y el ítem mantenible respectivo que fallo, esta información pasó a ser registrada en el formato para recolección de paradas del CMMS.

3.2.3 Calcular las Contribuciones Parciales, Totales de cada elemento y Ordenar. Para cada elemento o ítem mantenible contribuyente sobre las fallas, anotar su magnitud mediante la cual va ha ser cuantificado, para el caso de los compresores ubicados en la estaciones El Centro, Lisama y Llanito fue el tiempo de mantenimiento correctivo (TMCO) el cual se ordeno de mayor a menor según la magnitud de su contribución; luego se procedió a calcular la magnitud total del efecto como suma de las magnitudes parciales de cada uno de los elementos contribuyentes más la magnitud del elemento siguiente (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Cálculo de las Contribuciones Totales y Parciales del Tiempo de Mantenimiento Correctivo en las estaciones El Centro, Lisama y Llanito

EL CENTRO, LISAMA Y LLANITO			
Item Mantenible	PARADAS	TMCO	MAGNITUD TOTAL DEL EFECTO
VENTILADOR	2	2359,5	2359,5
DISTANCE PIECE	3	1546,5	3906
SCRUBBER	10	1259	5165
CILINDRO COMPRESOR	12	945,5	6110,5
ANILLOS	19	897	7007,5
VALVULAS	64	818	7825,5
VALVULA CARGA	64	491	8316,5
MULTIPLE ESCAPE	6	482	8798,5
TERMOCUPLA	7	451	9249,5
PANEL DE CONTROL	14	403,5	9653
ACOPLE	11	343,5	9996,5
GOBERNADOR	3	275,5	10272
PRESION DE SUCCION	3	191,5	10463,5
LINEA DE DESCARGA	2	183	10646,5
VALVULA DE SEGURIDAD	4	175,5	10822
PISTON	3	142,5	10964,5
CULATA	3	131	11095,5
SISTEMA LUBRICACION	2	113	11208,5
TUBERIA	1	111	11319,5
VASTIDOR	1	105	11424,5
TERMOCUPLA	1	104	11528,5
ELECTROVALVULA	1	100	11628,5
CARDAN	1	98	11726,5
CHEQUE SALIDA	2	97	11823,5
SWICHE NIVEL	1	95	11918,5
RTD	1	90	12008,5
FLUJO ELÉCTRICO	1	89	12097,5
NIPLE	1	85	12182,5
ALTA PRESION SUCCION	1	82	12264,5
PANEL DE CONTROL	1	80	12344,5
Total general	116	12344,5	

Fuente: Confipetrol S.A Campo Provincia.

3.2.4 Calcular Porcentajes Acumulados para Cada Elemento. Calcular el porcentaje que cada elemento representa sobre el total de horas correctivas con el fin de identificar el ítem mantenible que más problemas correctivos tuvo y cuál es su contribución respecto al total de problemas, el porcentaje de la contribución de cada elemento para las estaciones escogidas se calculó:

- %Contribución de cada elemento = (magnitud de la contribución del elemento/magnitud del efecto total) x100.

Con los datos de paradas de las estación se obtuvo el ítem mantenible ventiladores como el elemento que presento mayor número de horas correctivas de mantenimiento, para obtener la contribución de paradas correctivas del ítem mantenible ventiladores respecto al efecto total de horas no programadas de mantenimiento se procede de la siguiente manera.

- %Contribución Ventiladores= (TMCO Ventiladores/ TMCO Total)x 100
- %Contribución Ventiladores= (2359,5/12344,5)x100 = 19,11%

Del 100% de horas de paradas correctivas el ítem mantenible ventiladores genero el 19,11% de este tiempo, lo cual representa un gran porcentaje de horas utilizado en paradas de emergencia, estos tiempos correctivos se buscan evitar cambiándolos por tiempos programados para tener mayor control sobre el mantenimiento y los recursos utilizados, tanto económicos como de personal.

Luego se procede a calcular el porcentaje acumulado para cada los diferentes elemento de la lista ordenada que fallaron, el cual se calcula por suma de porcentajes de contribución de cada uno de los elementos anteriores más el porcentaje del elemento en cuestión. Continuando con los datos del ejemplo de las estaciones El Centro, Lisama y Llanito el siguiente ítem mantenible que mas causo horas de mantenimiento correctivas fueron la Guía de Cruceta (*Distan Piece*), continuando con el cálculo para los demás datos se procede.

- %Contribución Guía de Cruceta (*Distan Piece*) = (TMCO Guía de Cruceta/ TMCO Total) x 100
- %Contribución Guía de Cruceta (*Distan Piece*)= (1546,5/12344,5) x 100 = 12.52%

Este valor representa el 12.52% del total de tiempo de horas correctivo presentados en los compresores en el año 2009. Luego para generar la curva de Pareto se suman las contribuciones anteriores, el porcentaje de los Ventiladores y el de los Cilindros Compresores lo cual da como resultado.

- %Pareto=%Contribución Ventiladores+%Contribución Cilindros Compresores
- %Pareto=19,11%+12,52%= 31,6%.

Del 100% de las fallas en compresores la Guía de Cruceta (*Distan Piece*) y los Ventiladores ocasionaron el 31,6% de ellas. El mismo procedimiento se sigue con los demás Ítem Mantenible hasta generar diagrama de Pareto y la curva de Lorentz* e identificar los malos actores correspondientes al año 2009 los cuales son las fallas correctivas que representan el 80% de los problemas en los compresores de gas, de estos problemas más representativos se escogerá el principal problema para aplicarle la metodología análisis de causa raíz, realizando un informe formal sobre el problema que se presenta puede ayudar a ganarse el compromiso de la gerencia en la solución del problema ya que por medio del análisis cuantitativo de los datos puedo demostrar con datos verificables la magnitud del problema y las ganancias que se generarían si este es resuelto con una metodología adecuada como el RCA.

* La curva de Lorentz es una representación gráfica utilizada para plasmar la distribución relativa de una variable en un dominio determinado

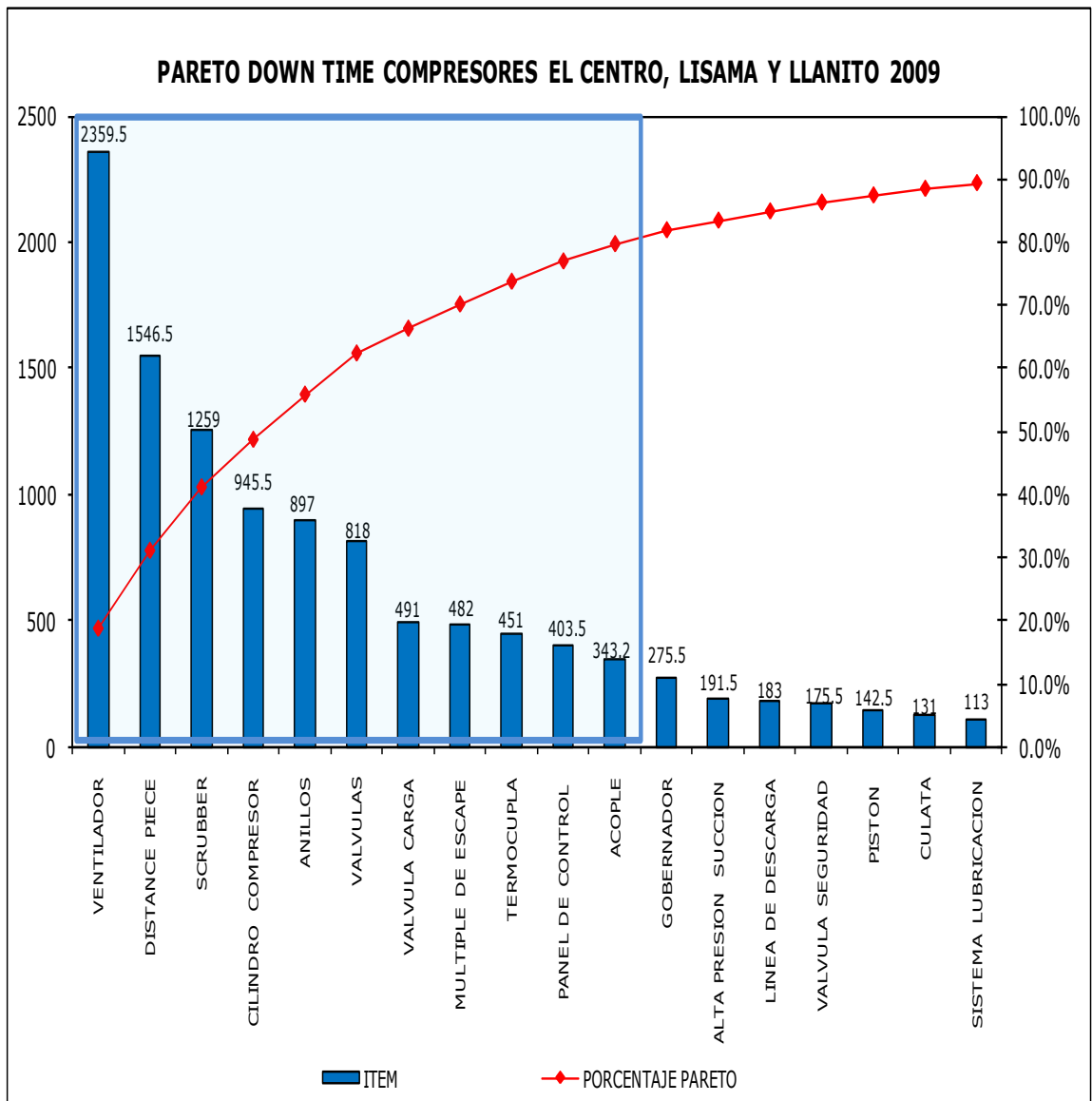
Tabla 8. Cálculo Porcentaje de Pareto.

EL CENTRO, LISAMA Y LLANITO				
Item Mantenible	PARADAS	TMCO	MAGNITUD TOTAL DEL EFECTO	PARETO
VENTILADOR	2	2359,5	2359,5	19,1%
DISTANCE PIECE	3	1546,5	3906	31,6%
SCRUBBER	10	1259	5165	41,8%
CILINDRO COMPRESOR	12	945,5	6110,5	49,5%
ANILLOS	19	897	7007,5	56,8%
VALVULAS	64	818	7825,5	63,4%
VALVULA CARGA	64	491	8316,5	67,4%
MULTIPLE ESCAPE	4	482	8798,5	71,3%
TERMOCUPLA	3	451	9249,5	74,9%
PANEL DE CONTROL	14	403,5	9653	78,2%
ACOPLE	11	343,5	9996,5	81,0%
GOBERNADOR	1	275,5	10272	83,2%
PRESION DE SUCCION	3	191,5	10463,5	84,8%
LINEA DE DESCARGA	1	183	10646,5	86,2%
VALVULA DE SEGURIDAD	4	175,5	10822	87,7%
PISTON	3	142,5	10964,5	88,8%
CULATA	3	131	11095,5	89,9%
SISTEMA LUBRICACION	2	113	11208,5	90,8%
TUBERIA	1	111	11319,5	91,7%
VASTIDOR	1	105	11424,5	92,5%
TERMOCUPLA	1	104	11528,5	93,4%
ELECTROVALVULA	1	100	11628,5	94,2%
CARDAN	1	98	11726,5	95,0%
CHEQUE SALIDA	2	97	11823,5	95,8%
SWICHE NIVEL	1	95	11918,5	96,5%
RTD	1	90	12008,5	97,3%
FLUJO ELÉCTRICO	1	89	12097,5	98,0%
NIPLE	1	85	12182,5	98,7%
ALTA PRESION SUCCION	1	82	12264,5	99,4%
PANEL DE CONTROL	1	80	12344,5	100,0%
Total general	116	12344,5		

Fuente: Confipetrol S.A Campo Provincia.

3.2.5 Diagrama de pareto sobre fallas en compresores. Con los datos de la Tabla 8 se realizó el diagrama de pareto, graficando en el eje axial el ítem mantenible (Elementos que contribuyen a la falla) y en el eje vertical el tiempo en horas de paradas correctivas (Efecto cuantificable) con el cual se identificaron los malos actores correspondientes al año 2009.

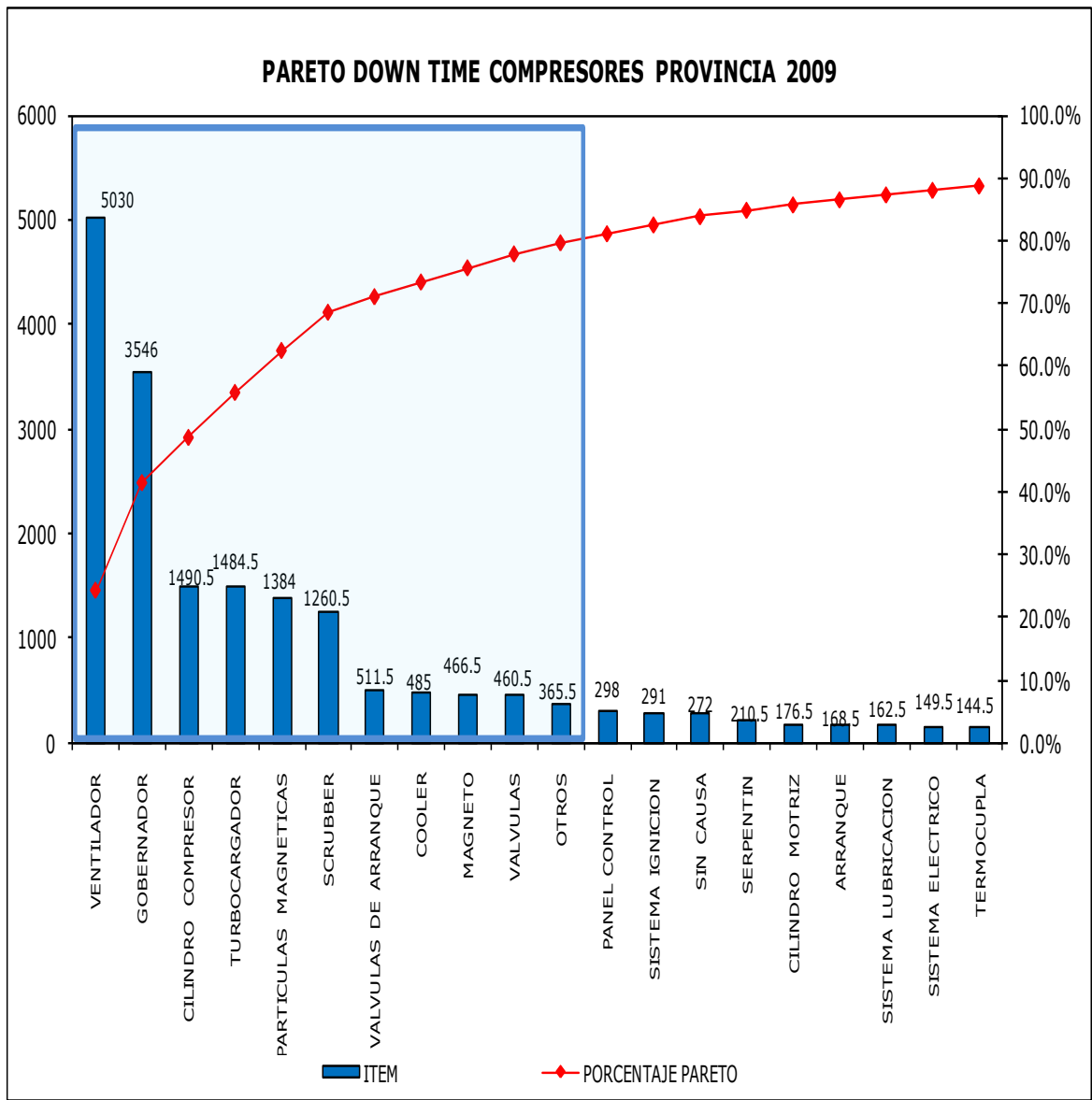
Figura13. Diagrama de Pareto Mal Actor Estaciones Lisama, Llanito, El Centro



Fuente: Autor

El mismo procedimiento seguido anteriormente para encontrar los malos actores para las estaciones del El Centro, Lisama y Llanito se realizo para la estaciones del campo provincia en el cual están ubicadas las estaciones de Santos, Suerte y Bonanza dando como resultado el siguiente diagrama pareto.

Figura14. Diagrama de Pareto Mal Actor Estaciones Santos, Suerte y Bonanza



Fuente: Autor

3.3 IDENTIFICACIÓN DEL MAL ACTOR

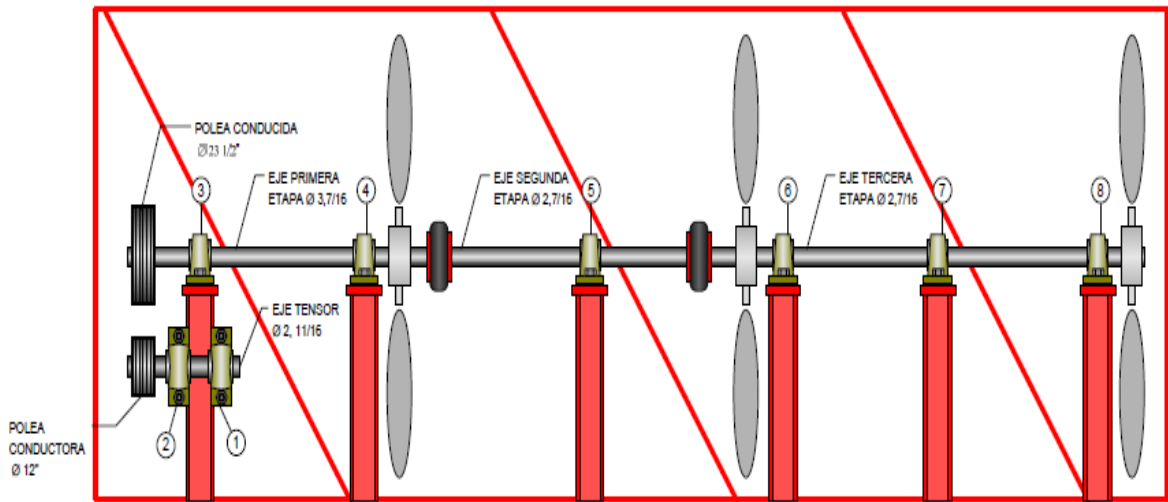
3.3.1 Descripción del Sistema Identificado como Mal Actor. El ítem mantenible identificado como mal actor fue los ventiladores por presentar el mayor porcentaje de horas correctivas durante el año 2009, tiempo en el cual los compresores estuvieron fuera de servicio. A la falla repetitiva presentada en este elemento se le aplicará la metodología de análisis de causa raíz (RCA) con la cual se buscara eliminar las principales causas que ocasionaron el problema.

Los ventiladores hacen parte del sistema de enfriamiento, el cual están conformados por aspas que impulsan aire fresco al interior del *cooler*, el aire por medio de convección forzada enfría el agua que es utilizada para extraer el calor de los cilindros compresores y también el gas que es comprimido. Los ventiladores están conformados por una serie de aspas contenidas en forma radial dentro de un anillo (*Hub*) y este a su vez está asegurado en el eje del ventilador por medio de un buje; el número de aspas depende de la presión y volumen de aire que requiera el sistema para pasar por el cooler, estas aspas van desde 2 hasta 16 dependiendo del volumen de aire que necesite el cooler.

Los ventiladores utilizados en los compresores de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM se encuentran conformados por ocho aspas y, la dirección de la corriente de aire que entra al cooler es paralela al eje del ventilador, el cual es movido por el motor que le transmite la potencia por medio de poleas.

El sistema de enfriamiento de cada compresor posee tres secciones de ventiladores (Ver Figura 15) debido a la gran cantidad de aire que debe circular por el cooler para enfriar la totalidad del agua utilizada en el proceso de enfriamiento y el todo el gas que es comprimido. El ancho de las aspas, su ángulo, su velocidad axial y número de etapas, son factores que intervienen en el diseño y la capacidad.

Figura15. Ventiladores Maquina Compresora 17LP Estación Santos.



Fuente: CONFIPETROL S.A Grupo Confiabilidad

3.3.2 Diagnóstico del Problema a Analizar. El problema presentado en los ventiladores de los equipos compresores de la SOM durante el año 2009 de las estaciones compresoras de los campos Lizama, Llanito, El Centro, Suerte, Bonanza y Santos generaron un tiempo total de paradas correctivas de 7389,5 horas correspondientes a 24 paradas en el año las cuales causaron \$183.204.800¹¹ en costos de mantenimiento, representados en horas extras de personal operativo para atender las paradas correctivas en los equipos y el valor de los repuestos utilizados en la restauración de la función del componente nuevamente.

Para analizar el problema se estudiaron las eventualidades ocurridas durante el año 2009 mediante la recolección de la información suministrada en los reportes de producción, histórico de mantenimiento e indicadores de gestión (Disponibilidad, Diferida y Tasa de Fallas), mediante la metodología de análisis Pareto. Las mayoría del total de paradas correctivas presentadas durante este año en los compresores, fueron originadas por problemas en ventiladores; se

¹¹ ECOPEPETROL S.A. Programa de Mantenimiento Ellipse. 2009.

reportaron 24 paradas equivalentes a 7389,5 horas fuera de servicio en equipos compresores de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM, de las cuales 20 (5030 horas) ocurrieron en los equipos compresores de las estaciones de Suerte, Santos y Bonanza y otras 4 (2359,5 horas) en las estaciones del Centro, Lisama ; situación que produjo un tiempo fuera de servicio de los compresores representativo y un número alto de paradas.

La tabla 9 presenta la evidencia las fallas ocurridas en los ventiladores de los compresores de la Superintendencia de Operaciones de Mares (Estaciones de Santos, Suerte, Bonanza, el Centro y Lisama) fallas generadas por rotura de aspas, daño en chumaceras, ruptura de tornillos del hub y problemas en el cardan.

Tabla 9. Equipos que fallaron por el ítem mantenible (ventiladores) durante el año 2009.

ESTACIÓN	EQUIPO	ELEMENTOS QUE CONTRIBUYERON A LA FALLA EN VENTILADOR	PARADAS TOTALES	TMC (TIEMPO DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO)
		ASPAS	9	6819.5
SANTOS	1 LP*		2	489
SUERTE	17 LP		1	132
SUERTE	3 RF*		1	35
SUERTE	7 LP		1	51.5
SANTOS	9 LP		2	3758
EL CENTRO	K1		2	2354
		CHUMACERA	10	551
SANTOS	12 LP		4	106
SUERTE	13 LP		2	184.5
BONANZA	2 LP		1	27.5
SANTOS	3 LP		1	154
SANTOS	7 LP		1	76
SANTOS	8 LP		1	3
		TORNILLOS DEL HUB	3	11
BONANZA	1 LP		2	9
LISAMA	6 LIS		1	2
		CARDAN	2	8
SUERTE	16 LP		1	4.5
EL CENTRO	K1		1	3.5
TOTALES			24	7389.5

Fuente: CONFIPETROL S.A. – Grupo de Confiabilidad

*LP (Low Pression) máquina compresora de baja presión

*RF Compresor de gas refrigerante

4. ANÁLISIS TEÓRICO-PRÁCTICO DEL PROCESO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ (RCA).

Este capítulo tiene como propósito fundamental mostrar el proceso de aplicación de la metodología de análisis de causa raíz RCA (análisis cualitativo), al mal actor (fallas en ventiladores) identificado en las estaciones compresoras de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM durante el año 2009; con el mismo, se busca encontrar las verdaderas causas del problema y sugerir acciones mejorativas que conduzcan a una solución definitiva de la falla.

4.1 INFORME SOBRE FALLAS REPETITIVAS EN VENTILADORES

4.1.1 Términos de referencia (TOR) para ordenar el análisis. Un informe preliminar de la falla repetitiva que se presenta en los ventiladores ayudara a obtener el compromiso por parte de la gerencia para la solución del problema, esto se hace con los términos de referencia. Es un informe en el cual se presentan los objetivos del RCA, los hechos que se presentaron en los diferentes equipos los cuales sumaron para que esta falla fuera seleccionada como mal actor, también se explica el alcance que tendrá el RCA la metodología utilizada y el personal necesario para la realización del ejercicio, este informe ayudara para que la gerencia se comprometa con la asignación de recursos para la implementación de las recomendaciones que al final del RCA saldrán como fruto final, también para que facilite el personal que se requiere en las diferentes secciones necesarias para dar una solución acertada a la falla presentada.

4.1.2 Organización del Equipo de Trabajo para el Análisis RCA. El equipo RCA es muy importante a la hora de analizar la falla, la conformación varía dependiendo del problema que se esté analizando; para el caso de la falla en

ventiladores presentada en los equipos compresores de la SOM, se trabajo con un grupo RCA integrado por las siguientes personas :

- Un Líder o Analista Principal: Encargado de liderar el análisis RCA, conocedor de la metodología y especialista en equipos reciprocantes, responsable de la administración del trabajo y del grupo encargado de realizar el análisis cualitativo de la falla en ventiladores. Este según, Robert J Latino debe poseer las siguientes cualidades:
 - Ser imparcial para llegar a la verdadera causa del problema.
 - Persistente, pues no debe retirarse en la primera señal de resistencia, y cuando se presenten obstáculos encontrar medios para resolverlos.
 - Organizado, velar por el desarrollo adecuado de la metodología del RCA
 - Diplomático para trabajar por el mismo objetivo con los medios que se cuentan y la cooperación del personal¹²
- Un Facilitador: integrante del equipo entrenado en la aplicación de la metodología RCA y encargado de explicar detalladamente los pasos a seguir por el equipo.
- Un Supervisor: cada estación cuenta con supervisores de área que tienen a su cargo los equipos compresores, en el RCA esta persona es quien más conoce y suministra información acerca del desempeño de los equipos durante un periodo de tiempo determinado (Año 2009).
- 2 Técnicos: encargados de brindar información acerca del armado y funcionamiento de las diferentes partes que componen el equipo compresor en especial el elemento afectado ventiladores.
- Un Proveedor de Ventiladores: encargado de suministrar información técnica relacionada con el montaje y mantenimiento de los ventiladores.

¹²LATINO. Robert J. Root Cause Analysis.2 ed. Virginia: CRC Press LLC, 2002. p.87

4.2 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ MEDIANTE LA HERRAMIENTA ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS

4.2.1 Introducción al árbol lógico de fallas. El análisis cualitativo de una falla cuenta con diversas herramientas para realizar el análisis de causa raíz, lo importante de la herramienta que se utilice es que los resultados a obtener sean acertados y precisos. Todas estas herramientas tienen algo en común, que trabajan mediante la relación de las causas y efectos para encontrar las causas posibles de la falla de una manera organizada.

El árbol lógico de fallas es considerado una herramienta de la confiabilidad operacional que “permite representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que nos conduce a descubrir el evento indeseable y cuál fue la causa raíz del problema”¹³. En la práctica el equipo RCA es quién coloca los datos de una falla en forma lógica y comprensible, mostrando en un diagrama la toma de decisiones verificadas a través de preguntas que ayudan a guiar al grupo en busca de la respuesta correcta.

De acuerdo con lo anterior, la construcción del árbol lógico de fallas en un proceso de RCA consta de los siguientes pasos que son descritos en la tabla que se muestra a continuación:

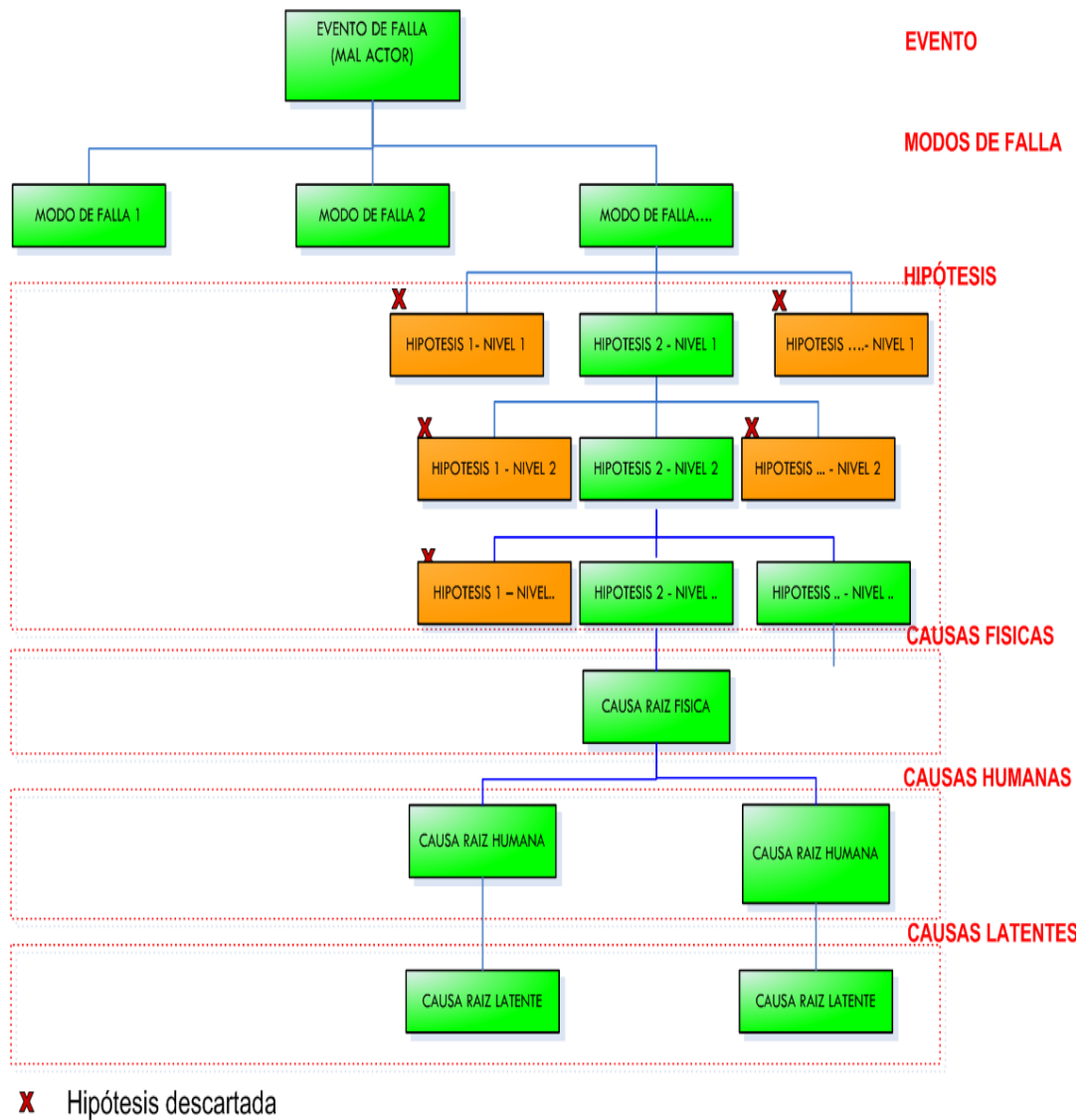
¹³ LATINO. Robert J. Calidad del Proceso y Análisis de Causa Raíz (Parte 1). (Consultado el día 3 de Noviembre de 2010) (Disponible Vía Internet)<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/11calidad.asp>

Tabla 10: Descripción de Pasos para la Construcción de un Árbol Lógico de Fallas

<p>1. EVENTO (MAL ACTOR): En este paso se realiza la descripción del mal actor o falla repetitiva que se encuentra ocasionando problemas y pérdida en la función de una pieza o proceso, el análisis de estos problemas debe basarse en hechos verificables que permitan iniciar el proceso de análisis de la falla.</p>
<p>2. MODOS DE FALLA: Los modos de falla son una descripción más detallada de cómo ocurrió el evento en el pasado, estos deberán estar basados en hechos. En este paso el análisis del mal actor son las diferentes fallas que originaron el problema principal y su función es dividir el problema central en cuadros más pequeños para hacerlo más manejable.</p>
<p>3. HIPÓTESIS: las hipótesis son suposiciones que se hacen respecto a la pregunta de cómo pudo suceder determinado modo de falla, estas pueden tener varios niveles de verificación dependiendo de la acertabilidad requerida.</p>
<p>4. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS: En la verificación de hipótesis se recurren a diversos métodos de validación con los cuales se aprueba la hipótesis propuesta como un hecho con los cuales se clarifica aun más el problema; los métodos más utilizados son: análisis y seguimiento de vibraciones, Observación humana, ultrasonido, fotografías, cámaras de video, termografía y alineación laser.</p>
<p>5. CAUSAS FÍSICAS: Este nivel reúne todas las causas de origen físico que pudieron dar origen a la falla, es la causa tangible. En este nivel no se encontrara la causa de la falla si no un punto de partida para resolver el problema, por lo que se deberá seguir con el análisis de falla.</p>
<p>6. CAUSAS HUMANAS: Errores cometidos por el factor humano que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla, estos pueden originarse por la falta de conocimiento en procesos y la toma de decisiones erradas que generalmente dan como resultados errores de omisión.</p>
<p>7. CAUSAS LATENTES: Son todos aquellos problemas que aunque no hayan ocurrido son factibles de que ocurran. También pueden ser considerados como los sistemas de organización que las personas utilizan para tomar decisiones, cuando estas son deficientes se traducen en errores de decisión que pueden ocasionar dificultades en el funcionamiento adecuado de los equipos, algunos ejemplos de estas causas pueden ser: falta de procedimientos, capacitación inadecuada del equipo de trabajo y problemas de comunicación.</p>

4.2.2 Pasos del Árbol Lógico de Fallas. En la elaboración del árbol lógico de falla se debe efectuar mediante un proceso ordenado, donde las diferentes etapas que lo componen guiarán al grupo de análisis del RCA a encontrar la causa raíz que está originando el problema, la estructura para el análisis de los elementos encontrados en cada una de las etapas genera un análisis combinatorio o ramificado llamado árbol lógico de falla cuya estructura conceptual es la siguiente:

Figura16. Pasos Árbol Lógico de Fallas

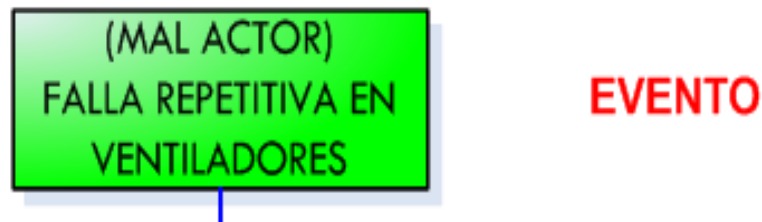


Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL S.A. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

4.3 CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS PARA ELMAL ACTOR (FALLA REPETITIVA EN VENTILADORES) IDENTIFICADO EN LOS EQUIPOS COMPRESORES DE LA SOM

4.3.1 Descripción de los Eventos Presentados en los Ventiladores. Los ventiladores presentaron diferentes problemas durante el año 2009(Ver tabla 9), estos ocasionaron en algunos equipos compresores paro total y parcial de su función; las fallas en los ventiladores más representativas fueron ocasionadas por: partida de aspas y rompimiento de los tornillos del *hub*, éstos eventos se convirtieron en fallas crónicas por su alta repetición y un gran numero horas de mantenimiento correctivo, afectando de en gran medida el funcionamiento adecuado de los compresores y el proceso de compresión de gas.

Figura: 17. Primer paso para la Construcción del Árbol Lógico de Fallas



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL S.A. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

A continuación se expone una secuencia de hechos ocurridos durante diferentes periodos de tiempo que evidencian las fallas presentadas en los ventiladores de los equipos compresores en la SOM y que constituyen un eje fundamental de observación y análisis para empezar a realizar el análisis causa raíz:

Figura 18. Aspa de Ventilador Partidas – Compresor 17LP. Estación Suerte



Fuente: CONFIPETROL S.A – Grupo de Confiabilidad

La figura 18, muestra las aspas de un ventilador partidas, hecho que ocasiono paradas en el equipo compresor mencionado y pérdidas económicas representadas en la compra de nuevos repuestos y descenso en la producción. De igual manera, este hecho ocasiono alta vibración en el eje del ventilador que activo el sistema de protección de la maquina y su posterior paro total.

Figura 19. Ventilador sin aspas de una Máquina Compresora.



Fuente: CONFIPETROL S.A – Grupo de Confiabilidad

Figura 20: Tornillo de Hub Torcido. Máquina 3 Refrigerante. Estación Suerte



Fuente: CONFIPETROL S.A – Grupo de Confiabilidad

Los tornillos partidos ocasionaron que las aspas que se encuentran soportadas con el Hub se soltaran produciendo daños en el ventilador.

Las anteriores imágenes, muestran los hechos más representativos que causaron la falla repetitiva en los ventiladores de las diferentes máquinas compresoras de la SOM, durante los meses de Enero a Diciembre del año 2009; esto corrobora el ítem mantenible ventiladores como mal actor.

4.3.2. Descripción de los Modos de Falla en Ventiladores. Después de describir todas las fallas que se presentaron en los ventiladores se procede a desglosar el problema general con el fin de definirlo más afondo e ir clarificando las posibles causas que lo originaron, esto se hace a través de los modos de falla que se observaron cuando ocurrieron los diferentes problemas en los ventiladores. La descripción más detallada de cómo sucedieron los eventos en el pasado debe estar soportada en hechos y no en suposiciones, esto es lo que le da forma de árbol lógico de fallas, herramienta que facilitara el análisis de la falla ocurrida; para el caso de la falla repetitiva en ventiladores los modos de falla fueron los siguientes:

- Ruido fuerte en el Cooler del Compresor: El primer indicio que muestra que algo grave está sucediendo con los ventiladores es el ruido anormal que se escucha en el cooler, es la primera forma de percibir la falla

- Parada de los Equipos por Vibración en el Cooler: En el momento de la verificación del ¿por qué? ocurrió el paro total de la máquina, el panel de control de la misma, mostro como falla la alta vibración en el Cooler.

Figura 21. Modos de Falla



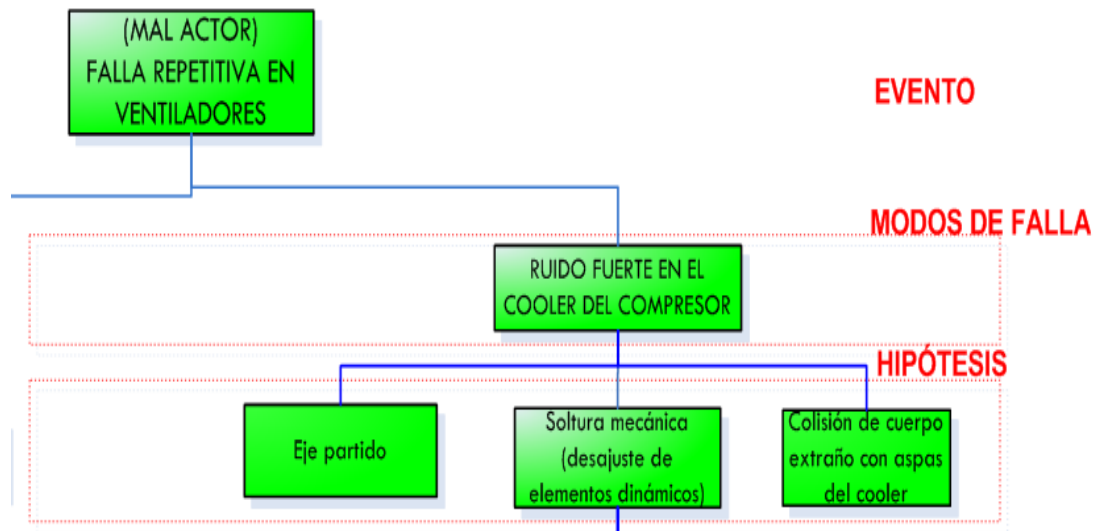
Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

4.3.3 Planteamiento de Hipótesis de falla. Continuando con el análisis RCA el grupo conformado para realizar el análisis procede a formular las hipótesis con las cuales se pregunta cómo pudo suceder el modo de falla, esto con el fin de clarificar el problema. Las hipótesis no son más que conjeturas que deben ser comprobadas para tomarlas como hechos y seguir avanzando el desarrollo de árbol lógico de falla.

Las hipótesis planteadas para los modos de falla fueron las siguientes:

- Eje partido
- Soltura mecánica (Desajuste de elementos dinámicos)
- Colisión de cuerpo extraño con aspas del Cooler

Figura 22. Hipótesis



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

4.3.4 Verificar Hipótesis. Para que las hipótesis se conviertan en hechos deben verificarse por diferentes métodos de validación los cuales pueden ser observación visual, análisis de datos y ensayos no destructivos con los que se refuerzan las bases para tomarla o no como una causa posible de la falla, por el contrario si una hipótesis es aceptada sin validación esta no sería más que una suposición que puede llevar a una solución errada del problema.

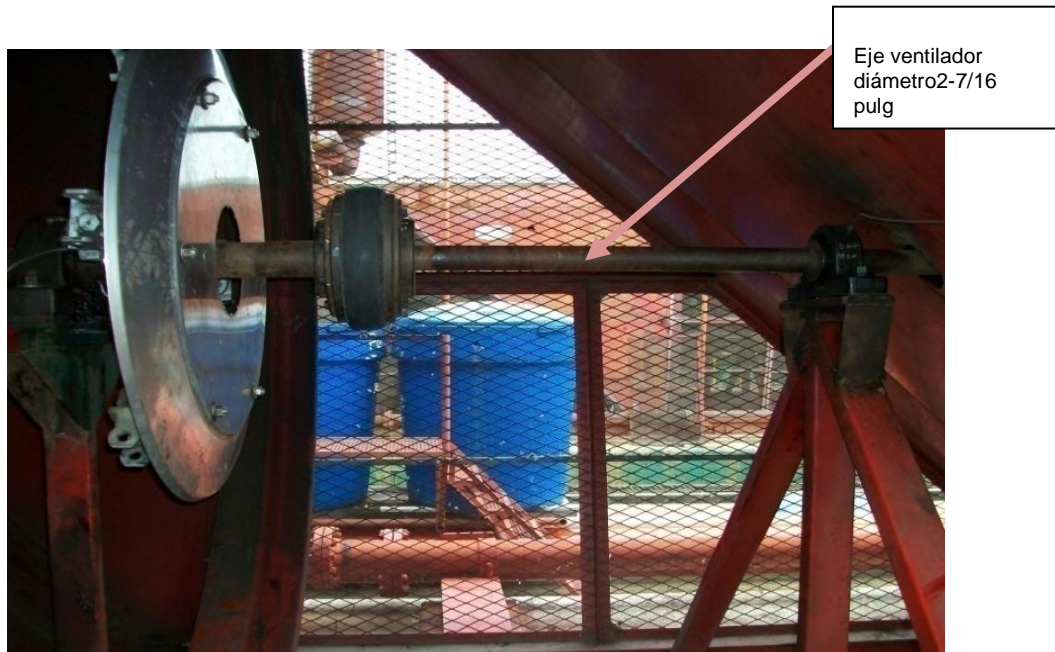
La verificación de Hipótesis para los modos de falla fue realizada de la siguiente manera:

Hipótesis 1: Eje partido

Para la verificación de esta hipótesis se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

- Observación Visual: donde se observó que el eje del ventilador se encontraba en buenas condiciones.
- Metrología: por medio de esta herramienta se verificó que el eje se encontraba en las medidas estándar (2-7/16 pulg).

Figura 23: Eje de Ventilador en buenas condiciones – Máquina 16LP Estación Suerte



Fuente: CONFIPETROL S.A – Grupo de Confiabilidad.

Esta hipótesis en el proceso de árbol lógico fue descartada porque durante el proceso de verificación no se encontraron elementos suficientes que la validaran.

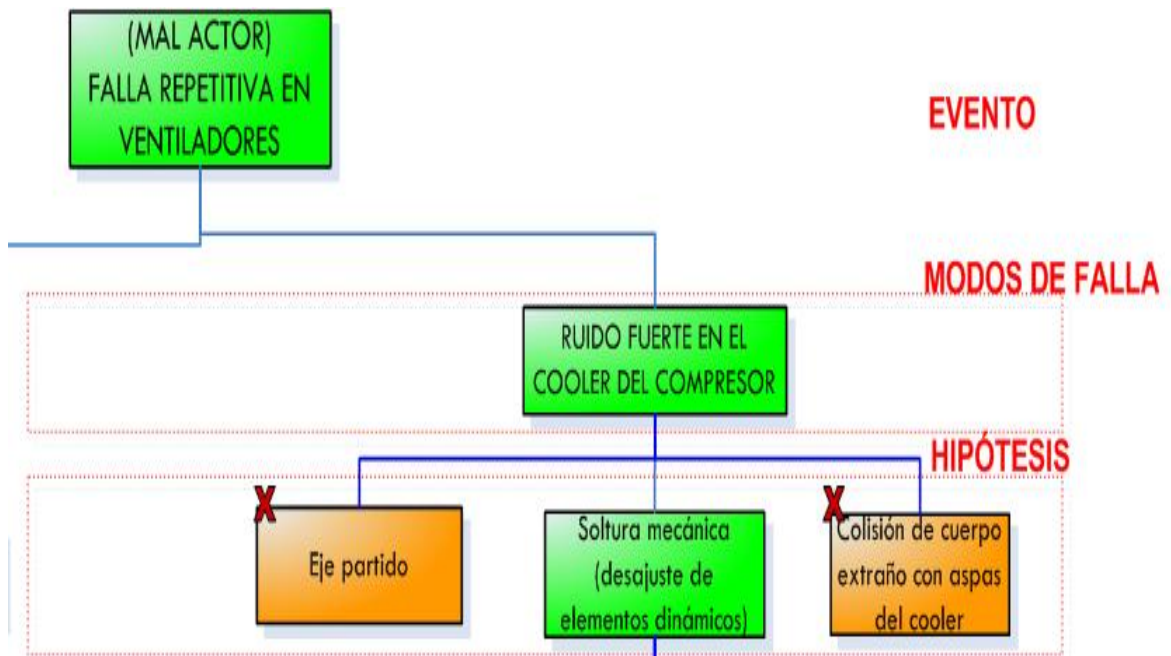
Hipótesis 2: Soltura mecánica (Desajuste de elementos dinámicos)

Se encontraron aspas y tornillos de sujeción del Hub partidos que pudieron ocasionarse por el desajuste en algunos elementos dinámicos. La observación visual y las imágenes tomadas en los elementos afectados (Ver figura 20) permitieron validar esta hipótesis como un hecho real para continuar con la construcción del árbol lógico de fallas.

Hipótesis 3: Colisión de cuerpo extraño con aspas del Cooler

No se evidenciaron cuerpos extraños ni marcas en las aspas del ventilador que indicaran colisión con cuerpos extraños, por lo tanto esta hipótesis fue descartada en el grupo de análisis RCA.

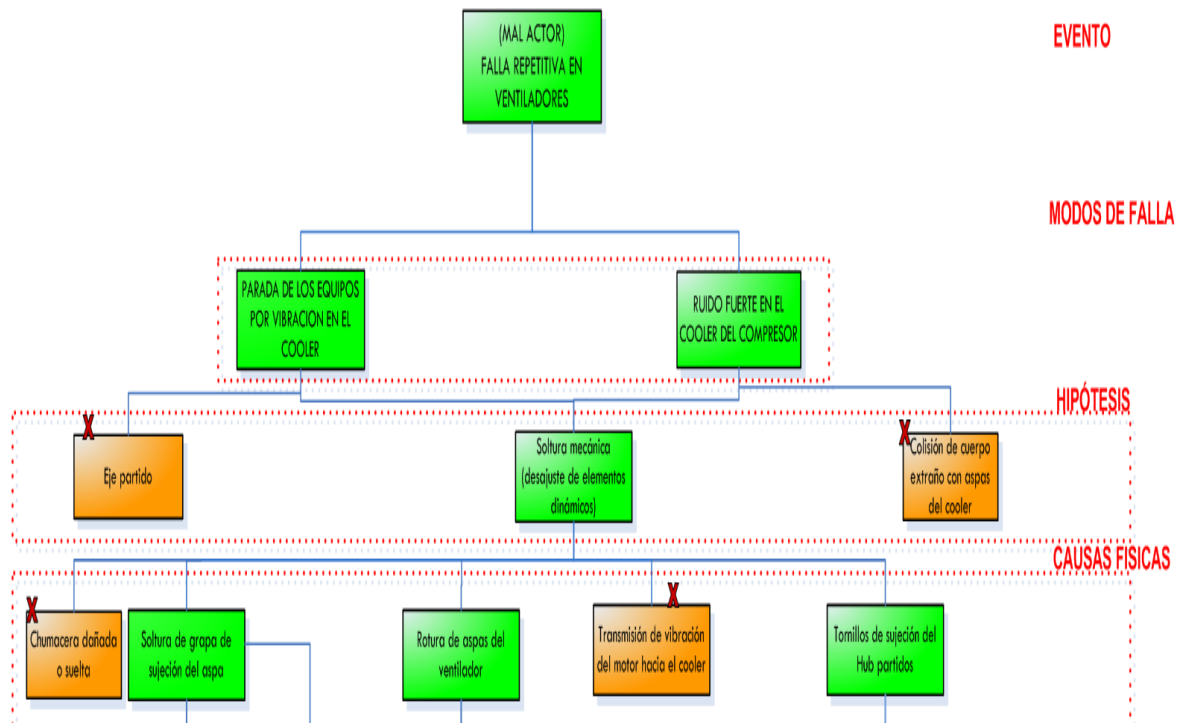
Figura: 24. Verificación y Descarte de Hipótesis



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

4.3.5 Estudio y Verificación de Causas Físicas. Para continuar con la construcción del árbol lógico de fallas de todas las causas físicas presentadas se toma como muestra la causa física, tornillos de sujeción del Hub partidos con la cual se explicara el procedimiento seguido por el grupo RCA, por ser el evento que en la práctica puede ser el más factible para verificar y que teóricamente permite explicar de una manera comprensible el proceso desarrollado para encontrar las causas raíces del problema. Este evento servirá como evidencia y referente para explicar cómo fueron analizadas las demás causas físicas identificadas como posibles causantes del problema. La verificación de hipótesis para esta causa física se realizó de la siguiente manera:

Figura 25: Hipótesis de Causas Físicas



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

Hipótesis 1: Tornillo Cumplió Ciclo de Vida

No se cuenta con mantenimiento preventivo e inspecciones periódicas que eviten el deterioro temprano de estos elementos.

Figura 26: Tornillo de Hub Deteriorado.

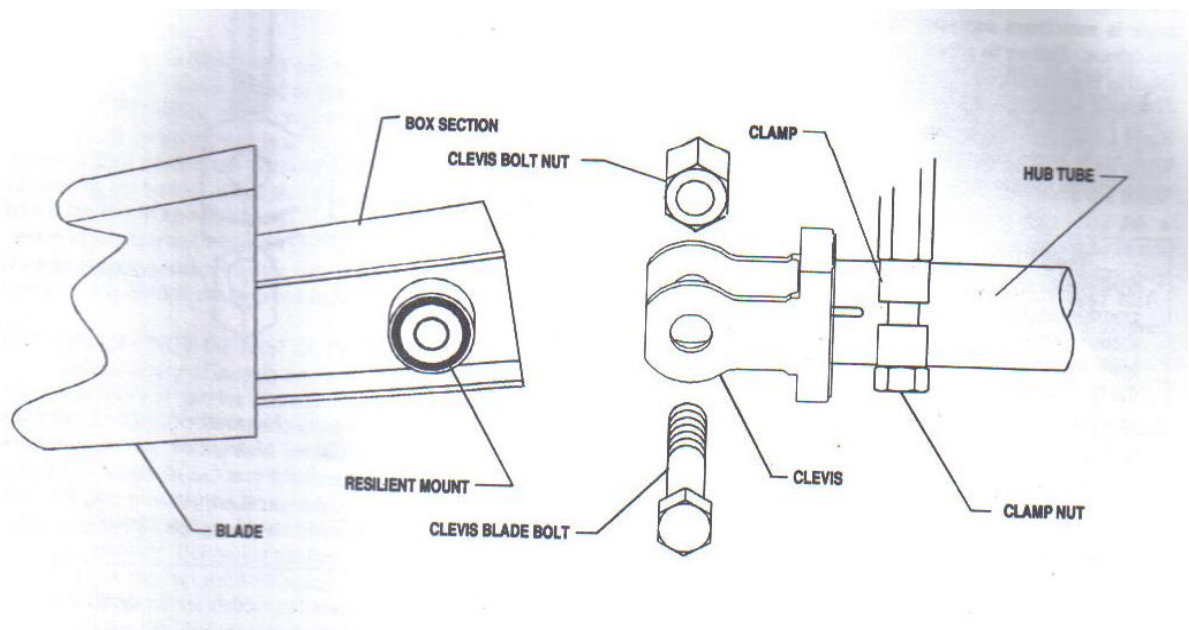


Fuente: CONFIPETROL S.A – Grupo de Confiabilidad.

Hipótesis 2: Tornillo Inadecuado

Se efectuó revisión de los diferentes tornillos que se encuentran colocados en los Hub de los ventiladores corroborando que se cuenta con el tipo de tornillo especificado por el fabricante; por tal motivo esta hipótesis fue descartada.

Figura 27: Tornillo Recomendado por el Fabricante, Utilizado Actualmente en los Equipos Compresores de la SOM.



Fuente: ECOPETROL S.A. Gerencia Regional del Magdalena Medio. Informe Reporte de Falla.

Hipótesis 3: Fatiga del Material del Tornillo

Los tornillos dentro de los cuales se encontró falla presentaron signos de fractura por fatiga de material, producida por esfuerzo repetitivo sobre estos elementos. Hipótesis que debe ser verificada para determinar la causa que esté causando la fatiga de material.

Hipótesis 3.1: Desbalanceo Dinámico del Ventilador

Durante la construcción del árbol lógico de fallas se determinó el desbalanceo dinámico del ventilador como la posible principal causa de la fatiga del material, esto teniendo en cuenta que los tornillos son originales y la información suministrada por el personal de supervisión y monitoreo de las máquinas compresoras.

4.3.6 Estudio y Verificación de Causas Humanas. Para el estudio de las causas humanas se tomó como evidencia la información que se encuentra en el CMMS de la empresa encontrando que no se realiza una rutina adecuada de mantenimiento para los elementos del ventilador.

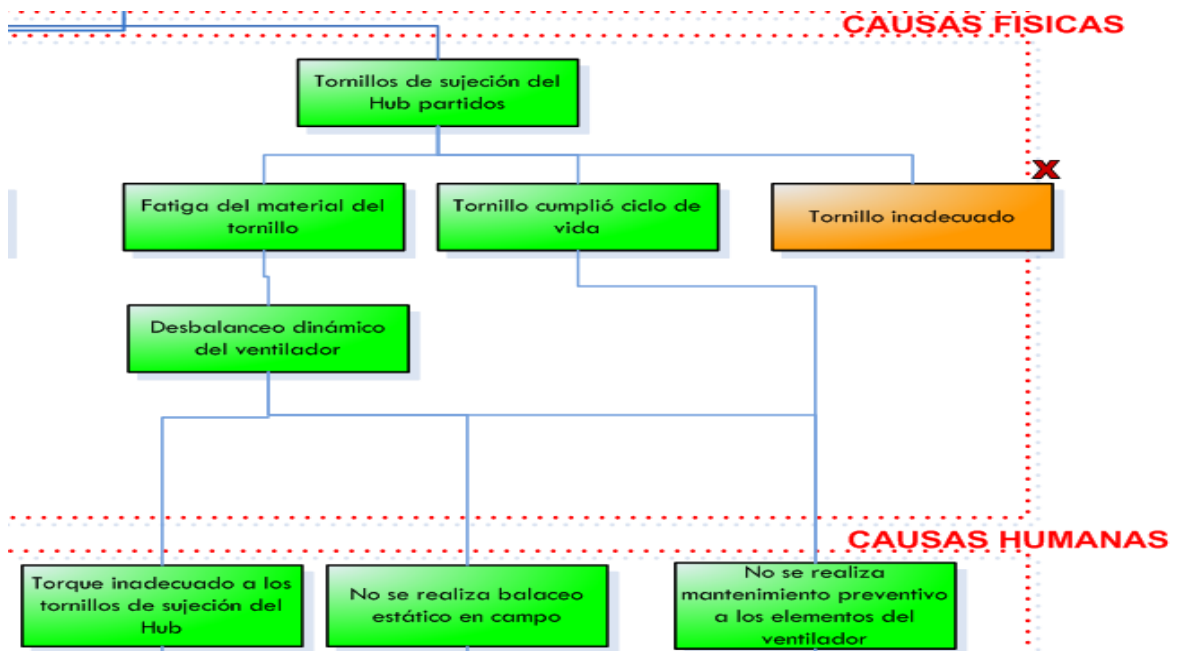
Por otro lado, el personal encargado del manejo de las máquinas compresoras no realiza un oportuno mantenimiento de los elementos que conforman el ventilador, lo que impide mitigar la ocurrencia de la falla.

Otra de las causas humanas identificadas, es la no realización del balanceo dinámico y estático de los elementos del ventilador en campo.

De igual manera, el torque inadecuado a los tornillos de sujeción del cooler, se constituyó en una causa humana, debido a que el personal de mantenimiento en ocasiones no cuenta con la información apropiada (Catalogo), que permita realizar una actividad laboral confiable y segura.

Las fallas de tipo humano fueron comprobadas por los históricos que se encuentran en el sistema de mantenimiento y el dialogo directo con el personal de mantenimiento y operación.

Figura 28: Verificación de Causas Humanas.



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

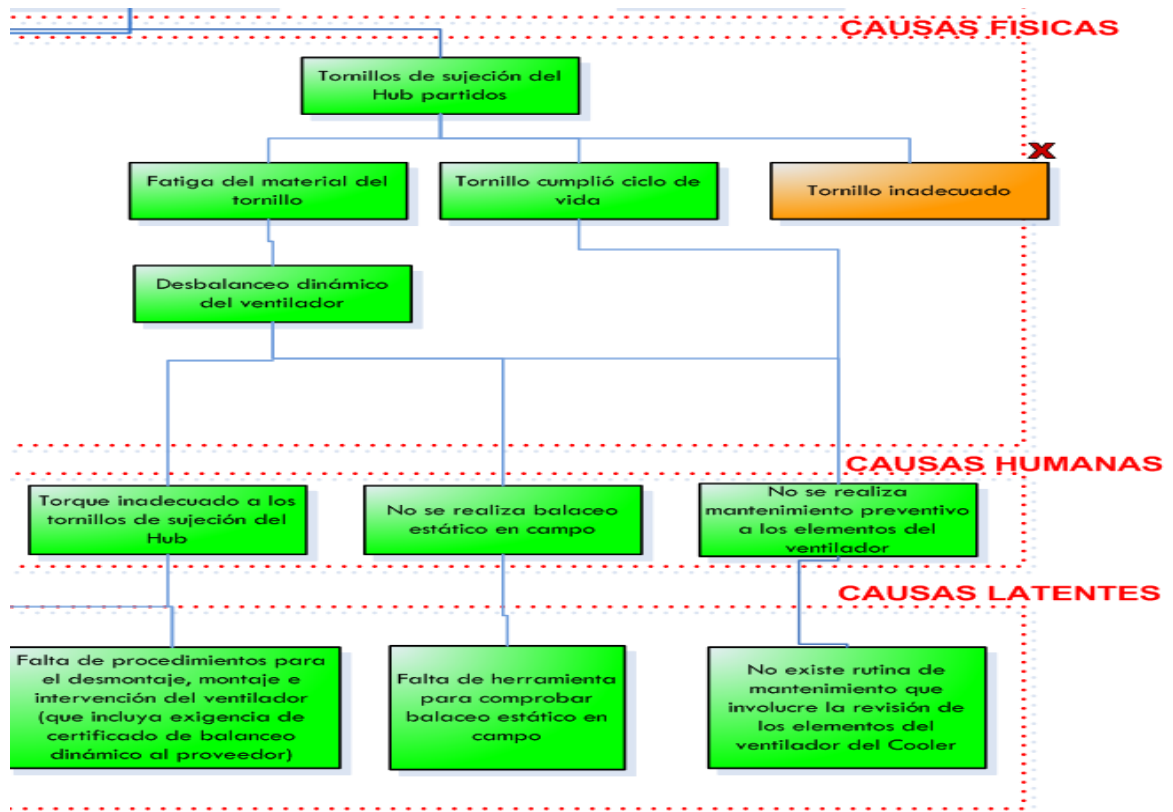
4.3.7 Estudio y Verificación de Causas Latentes. Para solucionar el problema de raíz se deben atacar las causas latentes que se encuentren al final del análisis, ya que estas son quienes realmente ocasionaron la cadena de eventos que produjeron la falla.

Las causas latentes identificadas para la causa física (Partidura de Tornillos del Hub) fueron las siguientes:

- Ausencia de una rutina de mantenimiento adecuada que involucre la revisión de los elementos del ventilador, lo que se convierte en una grave deficiencia para el sistema, ya que al no realizarse la implementación de actividades de mantenimiento preventivo los ventiladores presentaran una tasa más elevada de fallas.
- Falta de herramientas especializadas para comprobar el balanceo estático y dinámico en campo, que eviten el desbalance y/o causas posteriores de falla.

- Falta de procedimientos adecuados para el montaje, desmontaje e intervención de los ventiladores, que permitan balancear dinámicamente el ventilador.

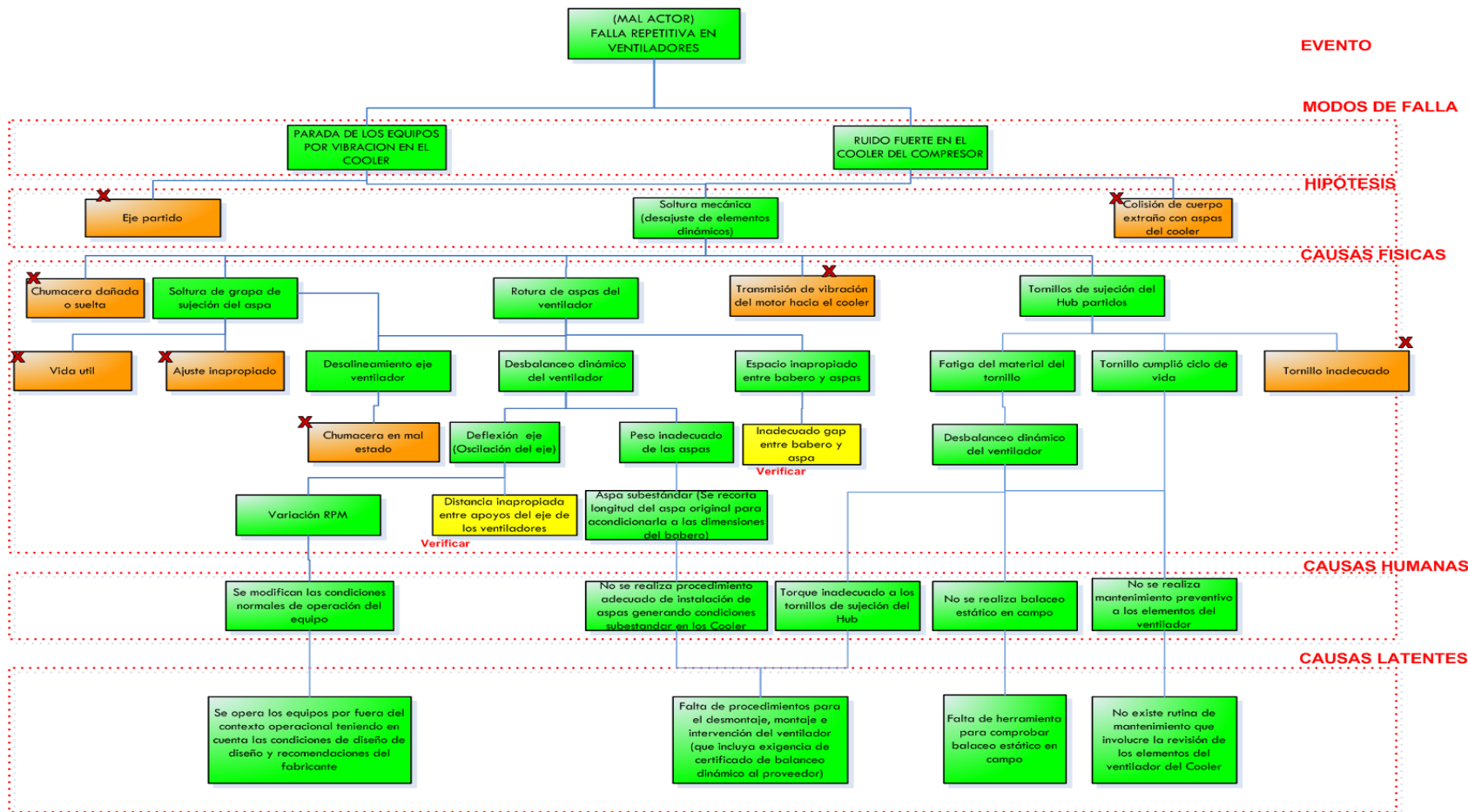
Figura 29. Estudio y Verificación de Causas Latentes



Fuente: ECOJETROL S.A y CONFIPETROL. Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

El árbol lógico de fallas que resultó al final del análisis RCA, de la falla repetitiva en ventiladores es presentado en la figura 30, evidenciando los pasos que siguió el grupo RCA para llegar a las recomendaciones finales del proceso de eliminación del mal actor en equipos compresores correspondiente al año 2009.

Figura: 30. Árbol Lógico de Fallas Mal Actor Ventiladores.



Fuente: ECOPETROL S.A y CONFIPETROL S.A Grupo RCA – Falla Repetitiva en Ventiladores

4.4 RECOMENDACIONES EMITIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LA FALLA

Las recomendaciones fueron formuladas de acuerdo a las causas latentes encontradas en la falla repetitiva en ventiladores, con estas se busca solucionar el problema de una forma definitiva, minimizar costos de mantenimiento, mejorar la disponibilidad de los equipos y disminuir pérdidas de producción por paradas. Estas recomendaciones estarán dirigidas a las personas que conforman el grupo de mantenimiento y operaciones encargado de las máquinas compresoras de la Super Intendencia de Operaciones de Mares.

Tabla 11. Recomendaciones Emitidas para la Eliminación de la Falla

Causa Latente	Recomendaciones
Se operan los equipos por fuera del contexto operacional sin tener en cuenta las condiciones de diseño y recomendaciones del fabricante.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operar los equipos compresores en el contexto operacional adecuado, teniendo en cuenta las condiciones de diseño y las recomendaciones emitidas por el fabricante. 2. Realizar inspecciones periódicas de control referidas al contexto operacional de los equipos compresores.
Falta de procedimientos para el montaje, desmontaje e intervención del ventilador (que incluya exigencia de certificado de balanceo dinámico al proveedor).	<ol style="list-style-type: none"> 3. Desarrollar el procedimiento adecuado para el montaje, desmontaje e intervención de los ventiladores 4. Realizar adecuadamente el procedimiento de balanceo dinámico en los ventiladores.
Falta de herramienta para comprobar balaceo estático en campo.	<ol style="list-style-type: none"> 5. Alquiler de herramientas especializadas para comprobar balanceo estático en campo, cuando sea necesario.
No existe una rutina de mantenimiento que involucre la revisión de los elementos del ventilador del Cooler.	<ol style="list-style-type: none"> 6. Establecer una rutina de mantenimiento estructurada a los ventiladores, donde se planteen actividades periódicas de mantenimiento preventivo.

5. PROPUESTA DE SEGUIMIENTO A LAS RECOMENDACIONES EMITIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LA FALLA

5.1 INTRODUCCIÓN

Las recomendaciones emitidas en el análisis de causa raíz son las que eliminarán el problema de una forma definitiva, por tal motivo, se hace necesario e importante diseñar un plan de seguimiento eficaz que permita la implementación adecuada y el cumplimiento satisfactorio de las mismas.

El sistema de seguimiento a las recomendaciones constituirá un paso importante en la eliminación definitiva del mal actor, ya que, este incluirá los recursos materiales, técnicos y de personal que son necesarios para llevar a cabo las diversas actividades propuestas en el plan. Durante la implementación del mismo, el personal de mantenimiento y operación desempeñarán un papel fundamental, porque, serán ellos quienes con sus capacidades, habilidades y potencialidades participarán activamente en el mejoramiento continuo de los procesos de confiabilidad operacional.

La siguiente propuesta contiene una Justificación dentro de la cual se expone la importancia de realizar seguimiento a las recomendaciones formuladas para la eliminación de la falla, un proceso metodológico que describe cada una de las fases del proceso, el objetivo de la misma, y un plan de seguimiento que presenta las actividades, metas, indicadores y responsables de la ejecución del plan.

5.1.1 Justificación. Teniendo como base, el proceso teórico– práctico de aplicación de la metodología de análisis causa raíz desarrollado en los equipos compresores de la Super Intendencia de Operaciones de Mares, surge la

necesidad de proponer al grupo de confiabilidad un sistema de seguimiento a las recomendaciones emitidas para la eliminación del mal actor en ventiladores, ya que este paso es considerado importante para evitar que las causas reales del problema se vuelvan a repetir.

De no llegarse a contemplar la posibilidad de implementación de algún sistema de seguimiento a las recomendaciones, “el RCA sería una actividad sin valor agregado y demasiado frustrante para el grupo de personas que realizó el análisis de falla, debido, a que se invirtieron recursos, conocimientos y esfuerzos que no serán reflejados en el funcionamiento adecuado de las máquinas”¹⁴.

- **Objetivo:** Proponer un sistema de seguimiento a las recomendaciones emitidas para la eliminación de la falla, que involucre la participación activa del personal de operación y mantenimiento.

5.1.2 Proceso metodológico. La propuesta del sistema de seguimiento a las recomendaciones emitidas para la eliminación de la falla, contara con las siguientes fases:

- **Fase de diseño:** El diseño del sistema de seguimiento a las recomendaciones contiene acciones mejorativas, actividades, metas, indicadores y responsables de la ejecución.
- **Fase de socialización:** La socialización de la propuesta del sistema de seguimiento y las conclusiones del proyecto fue presentada al grupo de confiabilidad de Confipetrol S.A. quienes determinaran su viabilidad y posterior implementación.
- **Fase de implementación:** Si la propuesta de seguimiento es aprobada, el grupo de confiabilidad sera quien determine la gestión de los recursos técnicos,

¹⁴ GARCIA PALENCIA; Oliverio. El Análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p. 11

financieros y de recurso humano necesarios para el desarrollo de las actividades propuestas en el plan de seguimiento.

- **Fase de retroalimentación:** Después de implementada la propuesta de seguimiento se recomienda realizar una retroalimentación que permita identificar las debilidades y fortalezas del sistema, además verificar la eliminación de la falla presentada en los ventiladores de los equipos compresores.

5.2 PLAN DE SEGUIMIENTO A LAS RECOMENDACIONES EMITIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LA FALLA.

Recomendación 1: Operar los equipos compresores en el contexto operacional adecuado, teniendo en cuenta las condiciones de diseño y las recomendaciones emitidas por el fabricante.

Acción Mejorativa: Socializar con el personal de operaciones y mantenimiento las recomendaciones emitidas por el fabricante en cuanto a las variables de operación del equipo.

ACTIVIDADES:

1. Investigar, estudiar y preparar la socialización de las recomendaciones de las variables operativas de los equipos.

Los equipos compresores están descritos en la tabla 1 por equipos compresores y motocompresores.

Variables equipos compresores:

El motor debe girar a 1000 RPM este tiene una transmisión por correas al ventilador la cual es una reducción 2 a 1 por lo tanto el ventilador debe girar a 500 RPM.

La presión de succión en la primera etapa del compresor debe ser de 25 psi y la presión de descarga deberá mantenerse a 1000 psi en la última etapa de compresión

Variables para equipos motocompresores:

El motor deberá girar a 400 RPM este tiene un acople directo con el eje del motor por lo cual el ventilador deberá girar a 400 RPM.

La presión de succión en la primera etapa del compresor debe ser de 25 psi y la presión de descarga deberá

mantenerse a 1000 psi en la última etapa de compresión. Estas variables deben mantenerse para que la velocidad del eje del ventilador no cambie.

2. Contactar el personal de mantenimiento y operación de las estaciones compresoras de la SOM para socializar las variables operacionales de los equipos:

META	INDICADOR	RESPONSABLES
<p>Informar al 100% del personal de mantenimiento y de operación a cargo de los equipos compresores las recomendaciones emitidas por el fabricante en cuanto a las variables de operación de los equipos.</p>	<p>Registro escrito de la actividad realizada en cada una de las estaciones compresoras.</p>	<p>Personal encargado del proceso de confiabilidad.</p>

Recomendación 2: Realizar inspecciones periódicas de control referidas al contexto operacional de los equipos compresores.

Acción Mejorativa: Inspeccionar periódicamente el funcionamiento de los equipos compresores, teniendo en cuenta las variables operacionales contenidas en el manual facilitado por el proveedor.

ACTIVIDADES: Visitas de seguimiento a los equipos de las estaciones compresoras de la Super Intendencia de Operaciones de Mares para verificar que las variables socializadas con el personal de operación y mantenimiento estén siendo puestas en práctica.

META	INDICADOR	RESPONSABLES
Lograr que en el transcurso de las visitas realizadas el personal de operación y mantenimiento conozca la importancia de operar los equipos de acuerdo con las variables recomendadas por el fabricante.	Registro escrito de visitas realizadas al personal de operación y mantenimiento ubicado en las estaciones compresoras de la SOM.	Personal CBM (Mantenimiento basado en Condición)

Recomendación 3: Desarrollar el procedimiento adecuado para montaje, desmontaje e intervención en ventiladores.

Acción Mejorativa: Estructurar el procedimiento adecuado para el montaje, desmontaje e intervención de ventiladores

ACTIVIDADES:

Para el desarrollo de esta acción Mejorativa se realizaran las siguientes actividades:

1. *Se describirán los pasos que deberán ser realizados en los procedimientos de montaje, desmontaje e intervención de ventiladores.*

1.1. Montaje

Para instalar el hub

1. *Instalar los 3 pernos de hub en la manzana del hub. Apretarlos solo a mano.*
2. *Deslice el buje por el eje y compruebe el ajuste apropiado. Compruebe que el eje haya atravesado completamente el buje.*
3. *Limpie cuidadosamente el orificio de dentro del hub y el orificio fuera del buje con un trapo limpio y seco.*
4. *Instalar el hub del ventilador en el buje, conectando con los espárragos el los orificios del buje, torque los tornillos adecuadamente.*
5. *Instalación y ajuste de aspas, limpie el perno del aspa con grasa luego con este conecte el aspa con el tubo del hub, donde se instalara el aspa, manteniendo el aspa en esta posición apriete el perno a un torque de 200 ft-lb (28m-kg), asegurar que el perno asegura completamente el aspa con el tubo del hub.*
6. *Ajustar el Angulo del aspa, afloje la tuerca de fijación lo suficiente para permitir que el aspa se doble y*

luego gire el aspa hasta el ángulo deseado, hacer un registro del ángulo seleccionado y verificar que todas las aspas queden con el mismo ángulo. Un típico ajuste puede ser +/- 3° de diferencia entre las aspas. El máximo ángulo de aspas recomendado es de 30°

1.2. Desmontaje

- *Soltar tensor de correas de transmisión del motor al eje del ventilador*
- *Soltar aspas del ventilador*
- *Soltar acople de caucho de los extremos del ventilador*
- *Soltar tornillería de los platos del acople de caucho y hacerlos hacia atrás*
- *Soltar tornillería sujetadora de las chumaceras y tubería de engrase y córrelos hacia un lado*
- *Remover unión guía de teflón*
- *Soltar la manzana del acople de caucho*
- *Soltar tuercas del hub de aluminio y extraerlos*
- *Soltar prisioneros de la manzana del hub y extraerlos*
- *Inspeccionar deflexión del eje*
- *Inspeccionar estado en que se encuentran los acoples de secciones de caucho*
- *Verificar tolerancia entre los platos del acoples de caucho(Tolerancia 2-1/16" +/- 1/32")*
- *El montaje se realiza el procedimiento contrario al descrito anteriormente*
- *Verificar angularidad de las aspas en los extremos (+/- 3°)*
- *Ajustar y engrasar chumaceras*
- *Revisar el estado de cada una de las aspas (Grietas, torsiones, etc.)*

- *Instalar correas nuevamente y Tensionar*
- 2. *Socializar los procedimientos anteriormente descritos con el personal de operación y mantenimiento de las estaciones compresoras*
 - 2.1. *Coordinación de actividades para la socialización con líderes de las estaciones compresoras*
 - 2.2. *Convocatoria del personal para realizar las actividades.*
- 3. *Retroalimentación de las actividades realizadas con el personal de operación y mantenimiento¹⁵.*

META	INDICADOR	RESPONSABLES
Lograr que el 100% del personal mantenimiento encargado de los equipos compresores conozca los procedimientos adecuados para el montaje y desmontaje de ventiladores.	Valorar el conocimiento adquirido por el personal de operación y mantenimiento, mediante encuentros que les permitan resolver casos prácticos de montaje y desmontaje de ventiladores.	personal de calidad (QA/QC)

¹⁵CLASS 10000 FANS OWER'S MANUAL INSTALATION MAINTENANCE OPERATION. p. 2 - 9.

Recomendación 4: Realizar adecuadamente el procedimiento de balanceo dinámico en los ventiladores.

Acción Mejorativa: Plantear el procedimiento adecuado para el balanceo dinámico de ventiladores

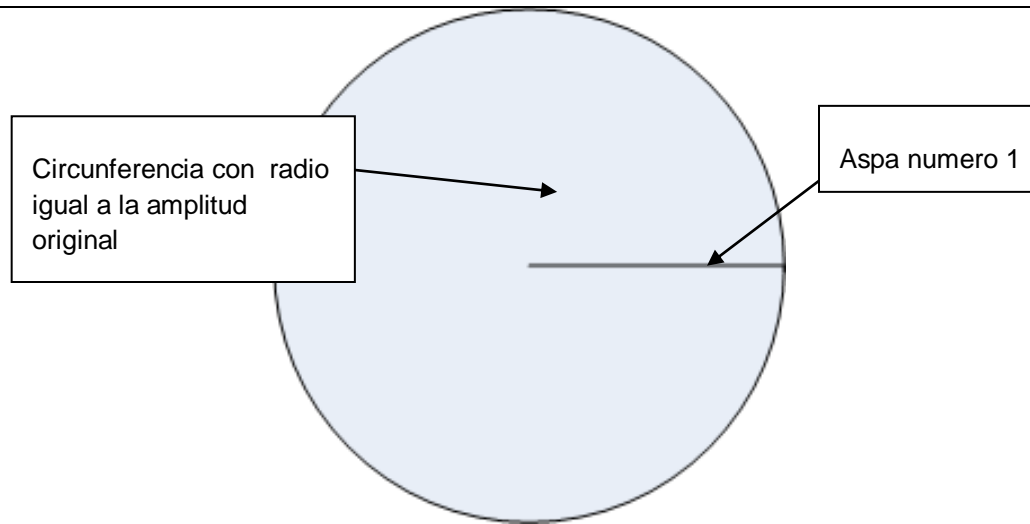
ACTIVIDADES:

- Descripción del procedimiento para el balanceo dinámico de ventiladores:

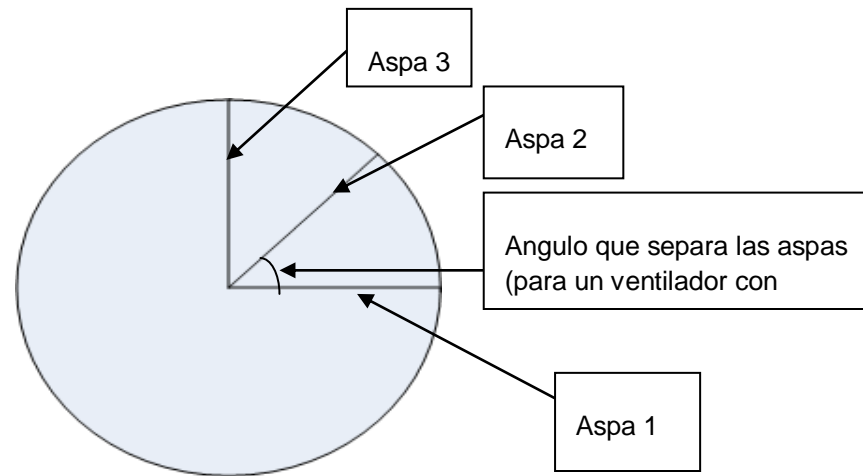
La utilización del siguiente procedimiento de balanceo es recomendado cada vez que se reemplace la unidad del ventilador o cuando se detecte una vibración excesiva.

1. *Bloquear y colocar tarjeta de seguridad sobre realización de trabajo al motor del ventilador.*
2. *Coloque firmemente el pickup sobre el eje del ventilador.*
3. *Determine las RPM a la cual gira el ventilador por medio de la relación de velocidades del motor al eje del ventilador.*
4. *Ajuste la frecuencia de operación de las RPM del ventilador en el analizador de vibraciones.*
5. *Asegúrese de que las piezas giratorias del ventilador estén libres de cables o demás herramientas, a continuación quite el bloqueo y la tarjeta de seguridad del motor.*
6. *Arranque la unidad y registre la amplitud de la vibración actual, por medio del analizador de vibraciones.*
7. *Pare la unidad y coloque una tarjeta al motor como advertencia que se está realizando trabajos en el motor.*
8. *Rotule las aspas del ventilador con los números 1, 2, 3, etc., en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj, empezando por cualquier aspa.*
9. *Coloque un peso de prueba para el aspa numero 1. (Nota; por lo general un peso de dos onzas en la punta del aspa es suficiente para ventiladores grandes y de bajas velocidades).*

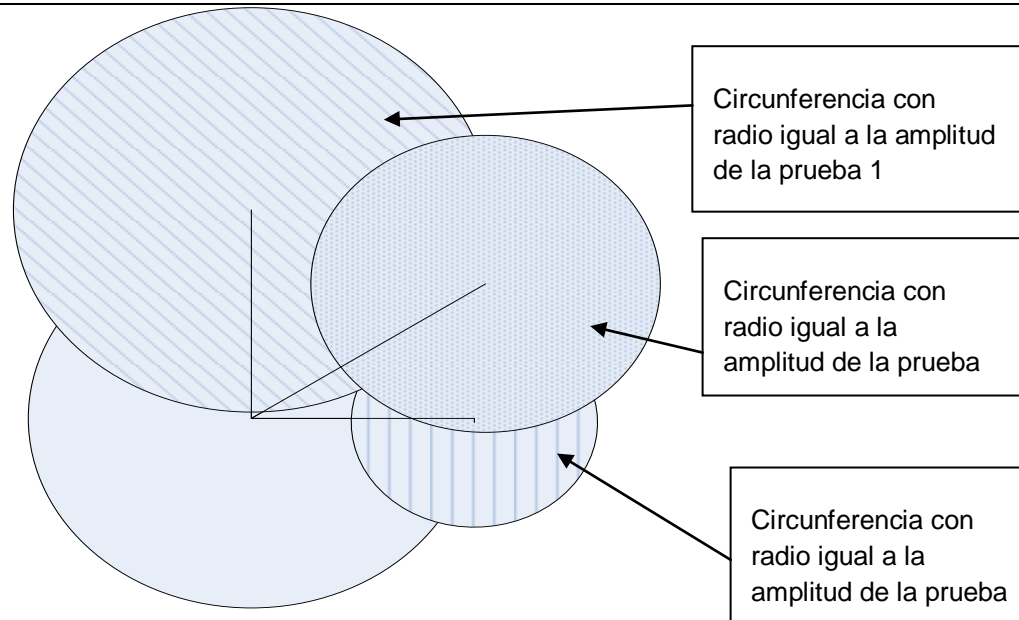
10. Asegurar que el peso de prueba este correctamente conectado al aspa.
11. Remueva la protección del ventilador y el desbloqueo y coloque el equipo en marcha.
12. Leer y registrar la nueva vibración (Esta es la prueba 1 del procedimiento).
13. Para el motor y bloquearlo, colocar tarjeta de seguridad y asegurar las aspas del ventilador.
14. Quitar el peso de prueba y colocarlo en el aspa dos a la misma distancia del centro a la cual se colocó en el aspa 1.
15. Repita los pasos del 10 al 13 para las aspas número 2 y 3, registrar las amplitudes de las pruebas correspondientes.
16. Anote el número total de aspas con las cuales cuenta el ventilador.
17. Determine el ángulo al cual están separadas las aspas, dividiendo 360° en el número total de aspas.
18. Seleccione una escala adecuada para la representación gráfica del desbalanceo en un papel milimetrado, asegurando que quede suficiente espacio para realizar varias circunferencias con radios iguales a las amplitudes tomadas en cada prueba a la escala seleccionada.
19. Dibuje un círculo en el centro de la hoja con radio equivalente a la amplitud original (amplitud sin masa de prueba), usando la escala seleccionada.
20. Dibujar una línea del centro de la circunferencia al círculo en la posición 3 horas en el reloj, y etiquete la línea como línea uno del aspa.



- 21. Usando un transportador mida desde la línea del aspa uno el ángulo que separa las aspas del ventilador en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj y dibuje una línea del centro de la circunferencia al círculo donde estará ubicado el punto para el aspa número dos.*
- 22. Repita el paso 21 donde colocara la línea que representa el aspa numero 3.*

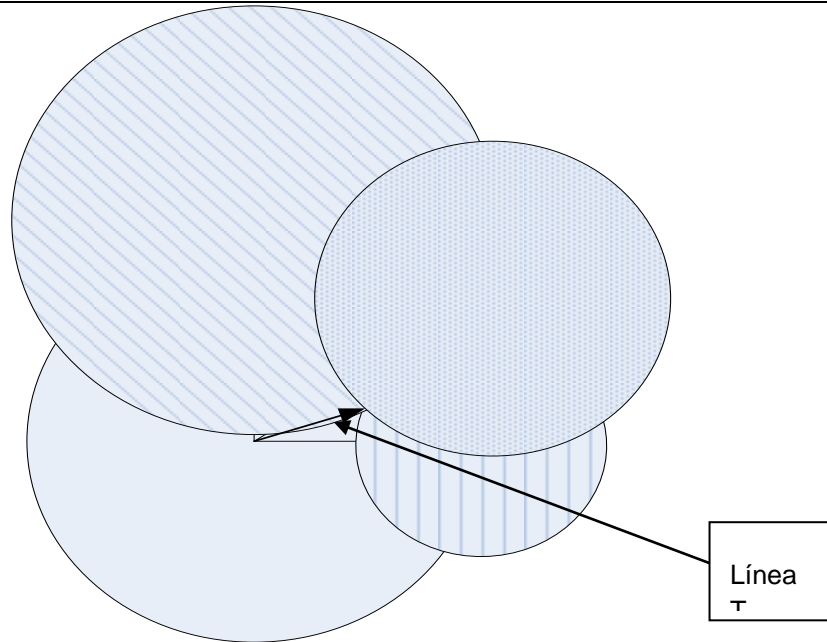


23. *En la localización de la línea del aspa número uno, en la circunferencia del círculo original construya un círculo con un radio equivalente a la amplitud de la primera prueba utilizando una escala adecuada.*
24. *En la localización de la línea del aspa número dos, en la circunferencia del círculo original construya un círculo con un radio equivalente a la amplitud de la segunda prueba utilizando una escala adecuada.*
25. *En la localización de la línea del aspa número tres, en la circunferencia del círculo original construya un círculo con un radio equivalente a la amplitud de la tercera prueba utilizando una escala adecuada.*



26. *En el punto donde se intersecan los tres círculos, dibuje una línea al centro del círculo original, llame a esta línea T.*

27. *Mida la longitud de la línea T usando el mismo factor de escala, para determinar la amplitud.*



28. *Determine el peso de corrección dividiendo la amplitud original entre la amplitud T y luego multiplicado por la cantidad de peso agregado.*

$$PESO DE CORRECCION = (O/T) * TW$$

TW = Peso agregado

O = Amplitud original

29. *Medir el ángulo que separa la línea del aspa uno con la línea T. Esta es la localización del peso de corrección.*

30. *Pesar la cantidad adecuada de peso de corrección que se añade. Asegúrese de fijarlo en la dirección correcta.*

31. *Remueva la tarjeta de seguridad y el desbloqueo del equipo en seguida de inicio a la unidad, mida y registre la nueva vibración.*
32. *Repita el procedimiento si las amplitudes no están dentro de la tolerancia.*
33. *Retire la tarjeta de seguridad y el bloqueo del motor y remueva el equipo de vibración.*
34. *Coloque la unidad en línea.*
- *Socialización del procedimiento de balanceo dinámico de ventiladores con el personal de operación y mantenimiento de las estaciones compresoras¹⁶.*

META	INDICADOR	RESPONSABLES
Lograr la implementación del balanceo dinámico en los ventiladores de los equipos compresores cuando este se requiera.	Registro escrito del balanceo dinámico realizado a los ventiladores.	Personal de CBM

¹⁶MC MILLAN, Robert. Rotating Machinery. Practical Solutions to Unbalance and Misalignment. Lilburn: Georgia. 2004.p. 220 -224

Recomendación 5: Alquiler de herramientas especializadas para comprobar balanceo estático en campo cuando sea necesario.

Acción Mejorativa: Gestionar recursos económicos para el alquiler de las herramientas especializadas para comprobar el balanceo estático y dinámico en campo.

ACTIVIDAD: Tramitar recursos económicos y herramientas especializadas para realizar el balanceo estático y dinámico.

META	INDICADOR	RESPONSABLE
Alquiler de un equipo especializado para balanceo estático y dinámico de ventiladores	Registro de gestión sobre alquiler de equipo para balanceo.	personal gestión de compras CONFIPETROL S.A.

Recomendación 6: Establecer una rutina de mantenimiento preventiva y estructurada que plantee actividades periódicas para la revisión de los elementos del ventilador del Coleer.

Acción Mejorativa: Elaboración de la rutina de mantenimiento.

ACTIVIDADES: La rutina de mantenimiento preventivo para la revisión de los elementos del ventilador del Cooler contara con los siguientes pasos:

- **INSPECCIONES PARA LA CUBIERTA DEL VENTILADOR**

1. *Inspeccione la cubierta del ventilador para verificar el deterioro, perdida y/o miembros rotos*
2. *Inspeccione las diferencias entre la cubierta que pueda producir corte de aire al sistema*
3. *Inspeccione la cubierta del ventilador y soportes para verificar deterioro y pérdida o miembros rotos.*
4. *Todos los sujetadores deben ser inspeccionados para asegurar que están bien apretados y libres de corrosión excesiva.*
5. *Registrar todos los resultados.*

- **INSPECCIÓN DE LOS VENTILADORES**

1. *Inspeccione el hub del ventilador en busca de signos de corrosión y asegurar que todos los tornillos estén en buen estado y torquados correctamente.*
2. *Inspeccione los dispositivos de sujeción del aspa en busca de corrosión, y asegúrese de que estos estén*

correctamente apretados. Compruebe que todos los tornillos sean del mismo grado y la misma longitud, asegurar si tiene arandelas que estén en su lugar y de las mismas dimensiones

3. *Inspeccione cada aspa del ventilador en busca de corrosión y erosión, las aspas deben ser inspeccionadas en busca de cualquier acumulación de materiales sólidos que puedan alterar las características del flujo de aire como el balanceo del ventilador.*
4. *Limpie las aspas de todo material extraño.*
5. *Verificar el estado en que se encuentran las chumaceras de los eje del ventilador*
6. *Inspeccionar deflexión del eje*
7. *Inspeccionar estado en que se encuentran los acoples de secciones de caucho*
8. *Verificar angularidad de las aspas en los extremos (+/- 6°)*
9. *Ajustar y engrasar chumaceras¹⁷*

META	INDICADOR	RESPONSABLES
Lograr la implementación de actividades de mantenimiento preventivo en los elementos del ventilador del Coleer.	Disminución en la tasa de fallas de los elementos del ventilador del Cooler.	Supervisor de cada estación compresora.

¹⁷Ibíd; 200 - 202

6. CONCLUSIONES

- La implementación de la metodología de análisis causa raíz al mal actor presentado en ventiladores de los equipos compresores de la Superintendencia de Operaciones de Mares SOM, permitió desarrollar un proceso ordenado de análisis de falla, con el cual se lograron identificar las verdaderas causas raíces del problema.
- El análisis pareto constituye una buena herramienta cuantitativa de identificación de problemas que a través de los registros de fallas incluidos en las bases de datos disponibles, permite mostrar claramente los malos actores que se encuentran afectando la productividad y disponibilidad de los equipos en un determinado tiempo.
- La identificación de los malos actores o fallas repetitivas en los equipos permite que el personal de confiabilidad realice canalización adecuada de los recursos disponibles para la solución de problemas, evitando de esta manera inversiones de alto costo en fallas que pueden o no ser consideradas de alto impacto.
- En ocasiones el análisis causa raíz RCA puede ser visto como un método correctivo, que actúa sobre los efectos producidos por aquellas causas reales o latentes no identificadas.
- El desarrollo adecuado del proceso de aplicación de la metodología de análisis causa raíz RCA, permite integrar conocimientos teóricos y prácticos que fundamentan la construcción de estrategias adecuadas para la eliminación de malos actores o fallas repetitivas.

- La implementación de un proceso adecuado de la metodología de análisis de causa RCA, requiere del compromiso de todas las personas que se encuentran involucradas directa o indirectamente con el mantenimiento de los equipos.
- Durante el proceso de aplicación del RCA, es importante dejar a un lado los dogmas y paradigmas existentes, ya que, estos pueden afectar el desarrollo adecuado de la metodología y obtener soluciones erradas del problema.
- La inclusión de técnicas cualitativas como el diálogo con informantes claves, la observación participante y el diálogo semi – estructurado con el personal de operación y mantenimiento, permitirán alimentar y sustentar con hechos las fallas repetitivas presentadas en los equipos; haciendo que el proceso de RCA sea más fluido y eficiente.
- En el RCA, realizar un plan seguimiento a las recomendaciones emitidas es muy importante, ya que, este permite llevar un control adecuado de las acciones mejorativas y actividades propuestas para la eliminación definitiva de la falla y/o mal actor identificado.
- Debido a la competitividad que existe en el medio u entorno, el análisis RCA constituye una metodología importante que puede ser aplicada satisfactoriamente en cualquier empresa u organización, ya que, esta optimiza costos al proporcionar los elementos necesarios para atacar y eliminar los problemas que impiden obtener una mayor rentabilidad.

BIBLIOGRAFIA.

CONFIPETROL S.A. Agregar Valor a la Operación. (Consultado 30 de Agosto de 2010)(Disponible vía internet) <http://www.confipetrol.com / Detalle.aspx?idDetalle=11>

CONFIPETROL S.A. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Gestión Gerencial. 2009

CONFIPETROL S.A. QA/QC, Campo Provincia (Sabana de Torres- Santander), Agosto de 2009.

CONFIPETROL S.A. (Consultado 30 de Agosto de 2010) (Disponible vía internet) <http://www.confipetrol.com>

Confiabilidad Operacional es Parte Vital en el Aseguramiento de la Productividad. (Consultado el día 30 de Septiembre de 2010) (Disponible Vía Internet) http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/reliability/confiabilidadoperacional.htm

ECOPETROL S.A.Mejoramiento de las Condiciones de los Separadores (Mecánica e Instrumentación) en las Estaciones Lizama, Llanito, Provincia y Bonanza. (Diapositivas) Barrancabermeja 2009.15 diapositivas.

ECOPETROL S.A. Manual de Operación de Compresores. Cuarta Edición. Barrancabermeja – Santander. Junio 1997. P.16-17

ECOPETROL S.A. Manual para la Aplicación de la Metodología de Análisis de Causa Raíz para la Solución de Problemas. p.39

GARCIA PALENCIA, Oliverio. El Análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional. Conferencia y Exhibición Reliability Word Latín América. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2005

GARCÍA PALENCIA, Oliverio. Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. 2005. (Disponible vía internet) (Consultado el día 30 de Septiembre de 2010)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Petroleum and Natural Gas Industries: - Collection and Exchange of Reliability and Maintenance data for Equipment. ISO, 2005, 15: il. (ISO 14224)

LATINO. Robert J. Root Cause Analysis. Improving Performance for Botton-Line Result. 2 ed. Virginia: Hopewell, 2002. p.103

MONCADA, Davian Augusto *et al.* Seminario de Investigación en Metodologías de Análisis de Fallas. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2009. 315 p.

MC MILLAN, Robert. Rotating Machinery. Practical Solutions to Unbalance and Misalignment. Georgia: Lilburn, 2004.p. 220 -224

OVALLE. Víctor. Experiencia y Tecnología; Soluciones Reciprocantes para Requerimientos del Siglo 21. (Diapositivas). 86 diapositivas.

ANEXOS

ANEXO A. Formatos Registro de Actividades Tendientes a Eliminar el Mal Actor en ventiladores



Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Recomendación 1: Operar los equipos compresores en el contexto operacional adecuado, teniendo en cuenta las condiciones de diseño y las recomendaciones emitidas por el fabricante .			
Fecha	Hora	Estacion	
Actividad 001:			
Objetivo:			
Metodología:			
Análisis:			
Responsable: Persona encargada del proceso de confiabilidad			

FORMATO SEGUIMIENTO MAL ACTOR VENTILADORES



Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Recomendación 4: Realizar adecuadamente el procedimiento de balanceo dinámico en los ventiladores.							
Estación		Equipo		Fecha		Hora	
Condición				RPM de verificación			
Antecedentes:							
Procedimiento realizado:							
Resultados							
Tolerancias permisibles de vibración para el rotor a (500 RPM)							
Tolerancia vertical	Excelente	Aceptable	Actual				
Vibración mm/s pk							
Grado de calidad aproximado							
Observaciones:							

FORMATO SEGUIMIENTO MAL ACTOR VENTILADORES