

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA “RCM” PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS COMPRESORES DE AIRE DEL
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA DE
BARRANCABERMEJA

SERGIO GALVÁN VARGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2019

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA “RCM” PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS COMPRESORES DE AIRE DEL
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA DE
BARRANCABERMEJA

SERGIO GALVÁN VARGAS

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

Director

JUAN GABRIEL MOYA BAUTISTA

Ingeniero Electromecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

*A Dios por darme la gracia de estar vivo
y compartir este logro con toda mi familia.*

*A mi esposa Gloria y a mi hijo Matías,
que tuvieron la paciencia de pasar gran tiempo sin mi presencia
y sacrificando lo más importante de todo ser humano “El tiempo”.*

Sergio Galván Vargas

AGRADECIMIENTOS

A Ecopetrol S.A, por el apoyo técnico y financiero ofrecido para el desarrollo de esta especialización.

Al Ingeniero Juan Gabriel Moya, director de este trabajo de grado, por su importante orientación, dedicación y respaldo.

A todo el equipo de trabajo del Departamento de Servicios Industriales Refinería de la Refinería de Barrancabermeja, por su importante aporte, indispensable para la realización de este trabajo de grado.

A todos mis familiares y amigos, que de alguna forma contribuyeron para obtener este gran logro.

Al cuerpo docente de la Universidad Industrial de Santander por el conocimiento compartido.

A todos los compañeros de la especialización.

El Autor

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
 1. GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA	 22
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA REFINERÍA.....	22
1.2 ORGANIZACIÓN	23
1.2.1 Gerencia General.....	25
1.2.2 Gerencia de Producción.....	26
1.2.2.1 Departamento de Materias Primas	27
1.2.2.2 Departamento de Refinación de Crudos	27
1.2.2.3 Departamentos de Cracking Catalítico I, II, III.....	27
1.2.2.4 Departamento de Petroquímicas, Parafinas y Fenol.....	27
1.2.2.5 Departamentos de Servicios Industriales Refinería y Balance.....	27
1.2.2.6 Departamento de Mantenimiento	28
1.2.3 Servicios Industriales Refinería.....	28
1.2.3.1 Tratamiento de Aguas.....	28
1.2.3.2 Generación de Vapor	28
1.2.3.3 Generación de Energía Eléctrica	29
1.2.3.4 Aire Comprimido	29
1.2.3.5 Distribución de gas Combustible.....	29
1.3 HISTORIA DE LA UNIDAD	29
1.3.1 Cargas de la Unidad	31
1.3.1.1 Agua Cruda.....	32
1.3.1.2 Aire	32
1.3.1.3 Gas natural	32
1.3.2 Productos de la Unidad.....	32

1.4 PROCESO DE GENERACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO	34
2. OBJETIVOS.....	39
2.1 OBJETIVO GENERAL	39
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	39
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	40
4. MARCO REFERENCIAL	44
4.1 MARCO TEÓRICO	44
4.1.1 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad R.C.M	44
4.2 MARCO CONCEPTUAL	47
4.2.1 Metodología R.C.M	47
4.2.2 Tareas de mantenimiento proactivas	49
4.2.3 Diagrama de decisión RCM	49
4.2.4 Compresores	51
4.2.5 Compresores centrífugos.....	51
4.2.5.1 Rotor	52
4.2.5.2 Rodamientos.....	52
4.2.5.3 Sellos	52
4.2.5.4 Difusores.....	53
4.2.5.5 Inter-enfriadores ES-BASCO	53
4.2.5.6 Motor Principal	53
4.2.5.7 Sistema de Lubricación.....	53
4.3 COMPRESOR CENTRÍFUGOS SERVICIOS INDUSTRIALES REFINERÍA...53	
4.3.1 Descripción de la Máquina.....	53
5. DESARROLLO METODOLÓGICO	55
5.1 CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO RCM.....	55
5.1.1 Relación Costo vs Beneficio	56

5.1.2 Ecuación de Pérdidas	58
5.1.3 Costo Hora – Hombre.	59
5.2 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO ÓPTIMA.....	59
 6. TAXONOMÍA	 62
6.1 DESCRIPCIÓN DE FRONTERAS	63
6.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ANALIZADO	64
6.2.1 Subsistema de compresión.....	65
6.2.2 Subsistema Motriz	66
6.2.3 Subsistema de Lubricación	66
6.2.4 Subsistema de Monitoreo y Control	67
6.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS.....	68
6.3.1 Población de equipos analizados.....	69
6.3.2 Modos de Falla	70
6.3.3 Plan de Mantenimiento	70
6.3.4 Tareas de mantenimiento por tipo y grupo ejecutor	72
 7. CONCLUSIONES	 74
 BIBLIOGRAFÍA.....	 76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura Organizacional de Ecopetrol S.A.....	24
Figura 2. Organigrama de la Refinería de Barrancabermeja.	25
Figura 3. Diagrama General de la Refinería de Barrancabermeja.	26
Figura 4. Sección de Aire Comprimido Sur.....	35
Figura 5. Sección de Aire Comprimido Norte.....	36
Figura 6. Configuración compresor centrífugo Centac.....	36
Figura 7. Compresores Sistema aire de instrumentos C2407 y C2408.	37
Figura 8. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-900.....	40
Figura 9. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-900.....	41
Figura 10. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-2400.....	41
Figura 11. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-2400.....	42
Figura 12. Árbol Lógico de Decisión RCM.	50
Figura 13. Componentes de un compresor centrífugo.....	52
Figura 14. Opciones de Mantenimiento.	60
Figura 15. Taxonomía.....	62
Figura 16. Frontera sistema de compresión.	63
Figura 17. Población Total de equipos analizados por cada compresor.....	69
Figura 18. Relación de Funciones, Fallas Funcionales y Modos de Falla obtenidos del RCM al Sistema de aire de los compresores centrífugos.	70
Figura 19. Número de tareas por clase de mantenimiento del Sistema de aire.....	71
Figura 20. Numero de tareas por Tipo de Mantenimiento.....	72

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Plantas Principales de la Refinería de Barrancabermeja.....	22
Tabla 2. Plantas Principales de la Refinería de Barrancabermeja.....	31
Tabla 3. Productos de la Unidad.....	33
Tabla 4. Tarifas Servicios Industriales Refinería 2018.....	42
Tabla 5. Pérdida económica del sistema de compresión de aire.....	58
Tabla 6. Tarifas HH (Labour Rate).....	59
Tabla 7. Listado de equipos del Subsistema de compresión.....	65
Tabla 8. Listado de equipos del Subsistema de Motriz de los Compresores.....	66
Tabla 9. Listado de equipos del Subsistema de Lubricación de los Compresores centrífugos.....	67
Tabla 10. Listado de tipos de equipos del sistema de Monitoreo y Control de los compresores centrífugos.....	68

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD, el cual puede consultar en la Base de Datos de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander)

Anexo A. Tabla Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA), RCM del sistema de Compresión.

Anexo B. Tabla Formato de Decisión, RCM del Sistema de Compresión.

Anexo C. Tabla Plan de Mantenimiento Sistema de Compresión.

Anexo D. Tabla Plan de mantenimiento recomendado por el fabricante.

GLOSARIO

ACTIVO: los edificios, planta, maquinaria y otros ítems permanentes requeridos por el usuario para producir y suministrar un producto.

CAJA NEGRA: objeto o equipo que se estudia desde el punto de vista de las entradas y las salidas o respuestas que produce, en donde en ningún momento se analiza su interior.

CLASE DE EQUIPOS: tipos similares de unidades de equipo. (Por ejemplo, todas las bombas).¹

CONFIABILIDAD: capacidad probada de los equipos, el proceso y las personas de una organización para cumplir con las expectativas establecidas en las áreas claves de desempeño, durante un intervalo de tiempo dado.

CONSECUENCIA DE FALLA: la manera o la evidencia en que los efectos de un modo de falla o una materia de falla múltiple impacten en la seguridad, el ambiente, la capacidad operacional, entre otros.

COSTOS DE CICLO DE VIDA (LCC, Life Cycle Cost): suma total de todos los costos incurridos por un activo o sistema de activos a través de todo su ciclo de vida.

DISPONIBILIDAD: habilidad de un componente o de un sistema para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un intervalo de tiempo dado.

¹ INTERNACIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224. 2 ed. Ginebra: ISO, 2006. 178 p.

EFFECTO DE FALLA: lo que ocurre inmediatamente después de un modo de falla, se clasifican en consecuencias de seguridad y/o ambientales, consecuencias de pérdida operacional y consecuencias de solo gasto de reparación.

EJECUTOR: se refiere a las personas encargadas de realizar una actividad específica. Los ejecutores, para el caso de mantenimiento de la Refinería, pueden ser directamente Ecopetrol o mediante una empresa contratista.

ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO: conjunto integrado de requerimientos y aproximaciones de gestión generales sobre los activos, especificando la aproximación y los métodos de gestión, posibilitando a la vez la información para la definición de los objetivos específicos de desempeño.

FALLA OCULTA: falla que no es inmediatamente evidente para las operaciones y el personal de mantenimiento. Los equipos que no cumple con la función en demanda caen en esta categoría. Estas fallas deben ser detectadas para ser evidentes.²

FRECUENCIA: número de veces que se repite una actividad de mantenimiento en un periodo de tiempo.

FRONTERA: interfaz entre un Ítem y su entorno.³

FUNCIÓN: todo aquello que el usuario espera que el activo o sistema lleve a cabo dentro de sus estándares de diseño o desempeño.

² INTERNACIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224. 2 ed. Ginebra: ISO, 2006. 178 p.

³ Ibid.

HSE: sigla que traduce Salud, Seguridad y medio ambiente.

LOPA: sigla que traduce Análisis de Capas de Protección. Es una metodología utilizada para efectuar la evaluación cuantitativa de peligros y riesgos.

MAINTENANCE EFFECTIVENESS INDEX (MEI): índice de eficiencia de Mantenimiento. Relación entre la reducción del riesgo económico anualizado y los costos de la reducción (Costos iguales del POC anualizado de las tareas del mantenimiento Proactivo).⁴

MANTENIBILIDAD: probabilidad de que un activo o sistema de activos sea reparado satisfactoriamente desde un estado de falla a un estado operativo en un tiempo determinado, bajo condiciones específicas.

MANTENIMIENTO: acciones técnicas y administrativas encaminadas a mantener un componente, o a restaurarlo a su estado inicial con el objeto de realizar la función requerida durante un tiempo establecido.

MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN: acción de mantenimiento preventivo como resultado de una condición probable de falla identificada a través de monitoreo continuo o rutinario.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO: acción de mantenimiento llevada a cabo después de ocurrida una falla, intentando devolver al equipo la capacidad de cumplir con su función.

⁴ ECOPETROL S.A. Instructivo para realización de talleres de análisis de RCM en Ecopetrol S.A. ECP-GCM-G-004. Bogotá D.C.: La Compañía. 14 p.

MANTENIMIENTO PERIÓDICO: mantenimiento preventivo llevado a cabo en un intervalo de tiempo predeterminado, número de operaciones, kilometraje, horas de servicio, etc.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO: acción de mantenimiento llevada a cabo en intervalos predeterminados o correspondientes a un criterio preestablecido, intentando reducir la probabilidad de falla o la degradación del desempeño de un equipo.

MANTENIMIENTO PROACTIVO: el mantenimiento planeado llevado a cabo a un intervalo predeterminado o correspondiente a criterio establecido (condición) y con la intención de reducir la probabilidad de falla o la degradación del desempeño de un ítem. También se conoce como la agrupación del mantenimiento preventivo y predictivo.⁵

MODO DE FALLA: cualquier suceso que ocasione una falla funcional.

MTBF: Mean Time Between failure, Tiempo promedio entre fallas.

RBI: sigla que traduce Inspección basada en Riesgo. Metodología a través de la cual se determinan las tareas de inspección de un activo en conjunto con sus frecuencias. Comúnmente orientada a equipos de naturaleza mecánica estática.

Run To Failure (RTF): Opción de mantenimiento para modos de falla para los que no se justifica realizar una de tarea de mantenimiento.

RCM: sigla que traduce Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Proceso para la determinación costo-efectiva de los requerimientos de mantenimiento de un activo.

⁵ ECOPETROL S.A. Instructivo para realización de talleres de análisis de RCM en Ecopetrol S.A. ECP-GCM-G-004. Bogotá D.C.: La Compañía. 14 p.

RELACIÓN COSTO-BENEFICIO (RCB): relación para determinar la viabilidad de realizar una tarea, mide el costo de realizar una tarea con respecto costo de la materialización de un modo de falla, teniendo en cuenta los efectos en HSE que se puedan asociar al mismo.

RUN TO FAILURE (RTF): opción de mantenimiento para modos de falla para los que no se justifica realizar una de tarea de mantenimiento.

SIL: sigla que traduce Nivel de integridad de la seguridad. Es una unidad de medida para cuantificar la reducción de riesgo.

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA “RCM” PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS COMPRESORES DE AIRE DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA.⁶

AUTORES: SERGIO GALVÁN VARGAS.⁷

PALABRAS CLAVES: COMPRESORES, RCM, MODO DE FALLA, EFECTOS DE FALLA, MANTENIMIENTO.

DESCRIPCIÓN O CONTENIDO:

Esta monografía muestra el desarrollo de un modelo de mantenimiento basado en RCM para la optimización de los compresores de aire del departamento de servicios industriales de la refinería de Barrancabermeja, realizado como respuesta a la necesidad de minimizar los impactos en la producción causados por la indisponibilidad de dichas equipos, y con el objetivo de girar hacia las tendencias de mantenimiento desarrolladas en la actualidad, que plantean modelos que se adaptan a las funciones y contexto operacional específicos de cada equipo. Características que cumple el mantenimiento centrado en confiabilidad.

Este desarrollo está soportado por la información técnica de los equipos y el conocimiento y experiencia del personal que opera y mantiene a los mismos. Soporte fundamental en cada una de las etapas de la aplicación de la metodología, principalmente durante la identificación de los modos de falla y efectos de los mismos. Una vez desarrollado esto, la metodología RCM, a través del diagrama de decisión, brinda una herramienta robusta que permite de una forma estructurada, establecer las actividades necesarias para preservar la función del activo. De esta forma, a través de RCM se logra optimizar las actividades de mantenimiento, eliminando de las rutinas aquellas tareas que no generan valor agregado.

El resultado debe estar acompañado de un compromiso en la ejecución de las tareas resultantes del RCM y un seguimiento constante por parte del personal de mantenimiento, buscando oportunidades de mejora en el modelo planteado que permitan incrementar la efectividad del mismo.

⁶ Monografía.

⁷ Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Juan Gabriel Moya Bautista, Ingeniero Electromecánico.

SUMMARY

TITLE: APPLICATION OF THE “RCM” METHODOLOGY FOR THE OPTIMIZATION OF THE AIR COMPRESSORS MAINTENANCE PLAN OF THE INDUSTRIAL SERVICES DEPARTMENT OF THE BARRANCABERMEJA REFINERY.⁸

AUTHOR: SERGIO GALVÁN VARGAS.⁹

KEYWORDS: COMPRESSORS, RCM, FAULT MODE, FAULT EFFECTS, MAINTENANCE.

DESCRIPTION OR CONTENTS:

This paper shows the development of a maintenance model based on RMC methodology for Carbones del Cerrejón’s portable substations. The main objective of this proposal is to minimize the impacts on production that could be caused by the unavailability of the portable substations. Furthermore, this paper proposes the application of a maintenance model based on equipment functions and equipment operating context. These features meet the new trend of maintenance programs that focuses on reliability.

The dissertation is supported by the equipment technical information obtained and the knowledge and experience of the workforce that operates and maintains the portable substations. The technical information and the workforce are the key-support in each stage mainly during the identification of failure modes and effects. After the identification, the RCM through the decision diagram provides a strong tool that allow in a structured way to establish the activities required to increase the efficiency and useful life of the assets. Therefore, the RCM optimizes the maintenance programs eliminating the tasks that no added value.

The result should be supported by a workforce’s commitment in the execution of the tasks proposed by RCM and the permanent monitoring by the maintenance workforce, in order to find the opportunities to improve the model presented and increase continuously its effectiveness.

⁸ Monography.

⁹ Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Juan Gabriel Moya Bautista, Electro-mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande y la principal compañía petrolera del país, cuenta con una infraestructura que integra el proceso de transformación de hidrocarburos, para garantizar la demanda y el consumo interno del país. en la actualidad Ecopetrol refina alrededor de 310 kbped entre sus dos refinerías.

En los últimos años la empresa ha tenido cambios en el área de mantenimiento principalmente en aspectos de tipo tecnológico, organizacional y documental, beneficiándose todas las plantas de la refinería de Barrancabermeja, e implementando sistemas de seguridad para asegurar la condición operativa de las plantas, tomando en cuenta los factores importantes de seguridad del personal y medio ambiente, gastos generales y la utilización de recursos disponibles.

La refinería de Barrancabermeja a través de su departamento de servicios industriales tiene un centro de producción de aire comprimido en la cual muchos procesos se realizan y se controlan de forma neumática. Los sistemas de aire comprimido están presentes en la mayoría de las industrias, ya que ayudan a mejorar la productividad, automatizando y acelerando la producción. Desde válvulas accionadas con aire comprimido, herramientas neumáticas y el uso del aire comprimido para soplado de ciertas partes de los procesos.

Un sistema de gestión es una estructura probada para la administración y mejora continua de las políticas, los procedimientos y procesos de la organización. Ayuda a que las empresas funcionen como unidades con una visión compartida. A fin de lograr los objetivos de la organización mediante una serie de estrategias, que incluyen la optimización de procesos, el enfoque centrado en la gestión y el pensamiento disciplinado.

Con el paso del tiempo, las empresas se dieron cuenta que se debía gestionar el mantenimiento, es decir darle mayor importancia e interacción con otras funciones. Por lo anterior es importante que la ejecución diaria de las labores de mantenimiento, tanto de las tareas planificadas como las no programadas tienen que ser evaluadas y las desviaciones controladas para orientarse continuamente hacia los objetivos del Departamento. Es de ahí que da apertura el siguiente proyecto, realizado para el sistema de compresión de aire del departamento servicios industriales refinería, los equipos de compresión de aire, juegan un papel importante para mantener la productividad y rentabilidad de la refinería, para que no causen un impacto económico ni ambiental a la compañía. En el siguiente proyecto se propone una mejora a la gestión actual de Mantenimiento, mediante el uso de la estrategia RCM II.

1. GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA REFINERÍA

El complejo industrial de Barrancabermeja procesa crudos de varias especificaciones para producir diferentes tipos de productos requeridos por el mercado nacional.

El área de refinación produce principalmente gasolinas y destilados. El área de petroquímica elabora productos petroquímicos tales como bases lubricantes, parafinas, aromáticos y polietilenos.

En el área de cracking se cargan gasóleos principalmente para producir GLP y nafta por medio del rompimiento de moléculas de hidrocarburos grandes.

Los productos terminados y el recibo de crudos se realizan en el Área de Materias Primas.

Los servicios industriales son generados en la refinería con recurso propio.

Tabla 1. Plantas Principales de la Refinería de Barrancabermeja.

Cantidad de Plantas	Plantas
5	Destilación Atmosférica de Crudo
4	Destilación al Vacío de Crudo
4	Ruptura Catalítica
2	Viscorreductora
1	Demex (Desasfaltado con Solvente)
1	Unibón (Hidrodesulfurización)
2	Generación de Hidrógeno

Cantidad de Plantas	Plantas
1	Alquilación (Avigas)
1	Ácido Sulfúrico
1	Aromáticos
1	Parafinas
1	Turboexpander
2	Etileno I y II
2	Polietileno
1	Nitrógeno
1	Plantas de Especialidades
3	Recuperación de Azufre
1	Tratamiento de Aguas Ácidas
1	Tratamiento de Aguas Residuales
2	Unidades de Servicios Industriales
1	Unidad de Cogeneración Turbogás

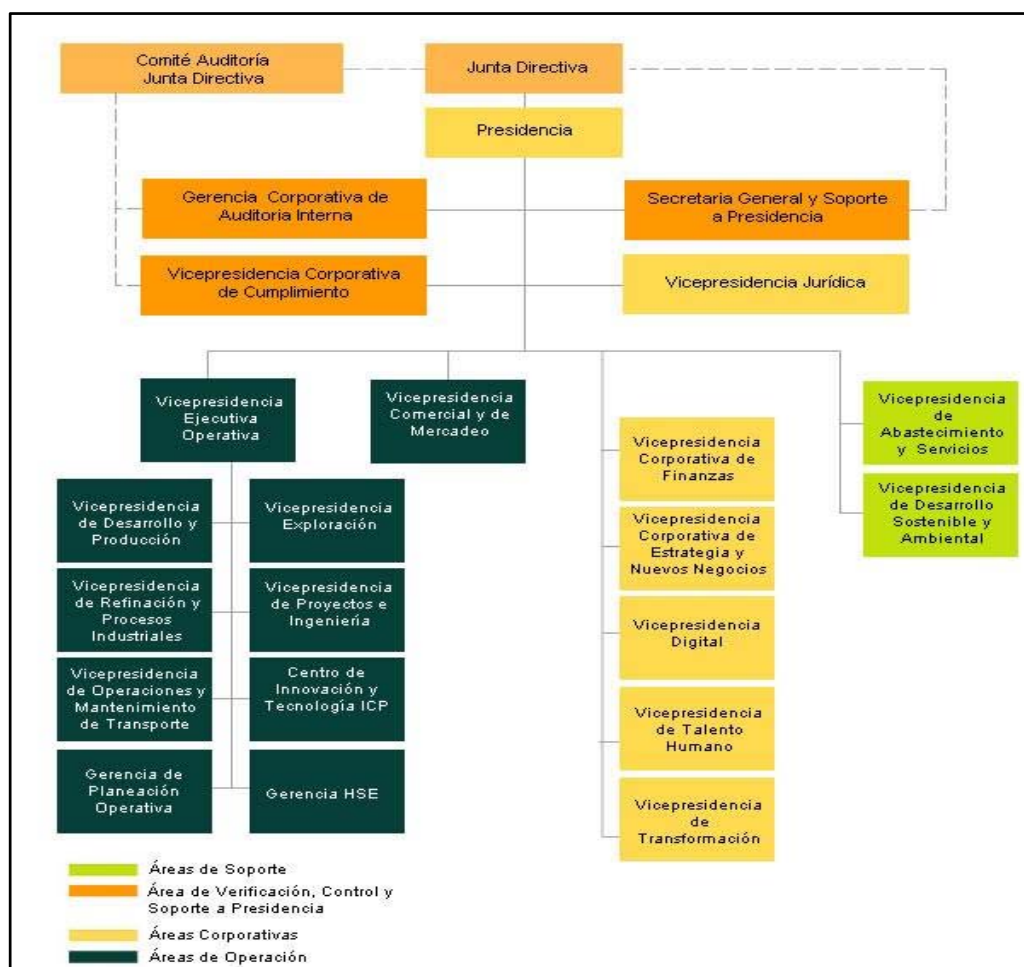
1.2 ORGANIZACIÓN

El órgano de dirección de Ecopetrol S.A. lo constituye la Asamblea General de Accionistas, que se encuentra integrada por los titulares y/o apoderados de las acciones de capital suscritas, reunidos de conformidad con las normas establecidas en la Ley y los Estatutos Sociales.

La Junta Directiva es el órgano de Administración de Ecopetrol y está integrada por nueve (9) miembros principales sin suplentes, quienes son elegidos por la Asamblea General de Accionistas en los términos establecidos en los Estatutos Sociales.

Composición del Comité Directivo Da direccionamiento estratégico y efectúa seguimiento sistemático a las actividades a cargo de la compañía y recomienda mejoras y retos para asegurar la sostenibilidad y la generación de valor. Así mismo, participa en la elaboración de políticas corporativas y da recomendaciones al respecto.

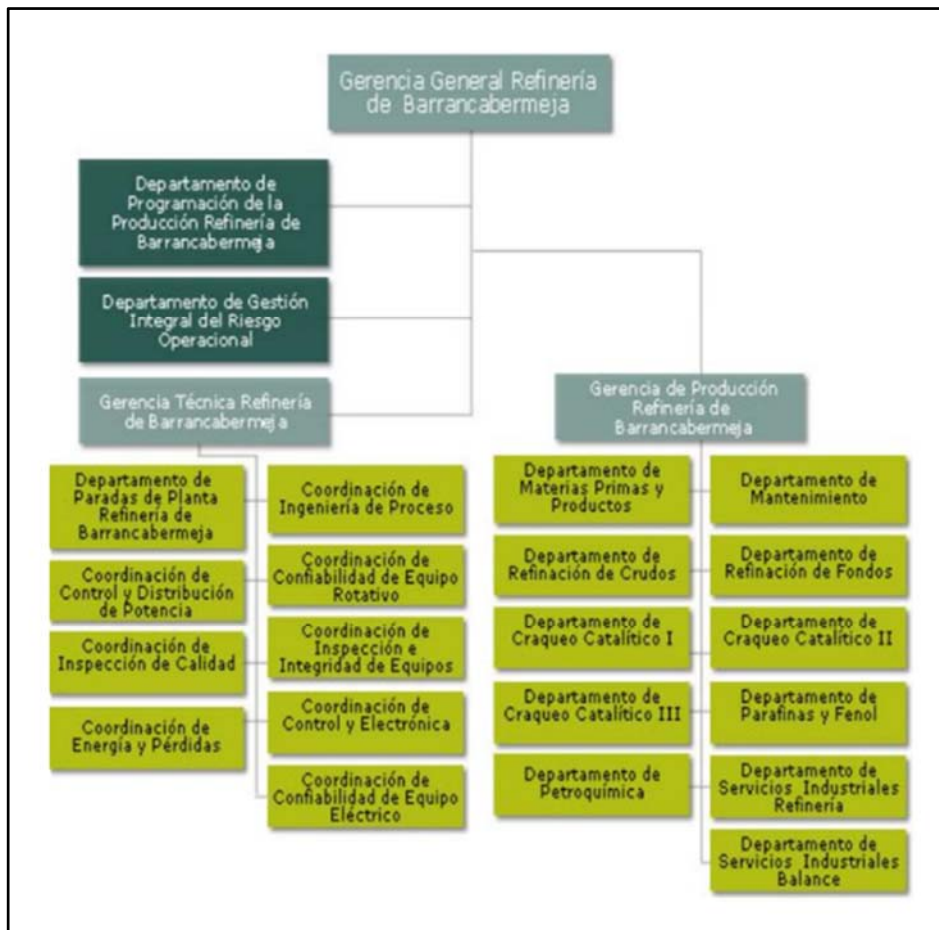
Figura 1. Estructura Organizacional de Ecopetrol S.A.



Fuente: ECOPETROL S.A. Organigrama. [En línea]. [Consultado el: 13 de febrero de 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/estructura-organizacional/organigrama>

Las vicepresidencias ejecutivas son las encargadas de la planeación y operación de los procesos Upstream (Exploración y producción) y Downstream (Refinación y Petroquímica, Transporte, Distribución y Comercialización de crudo, gas y derivados del petróleo) y la vicepresidencia de servicios y tecnología es responsable por la operación de los procesos habilitadores o de soporte.

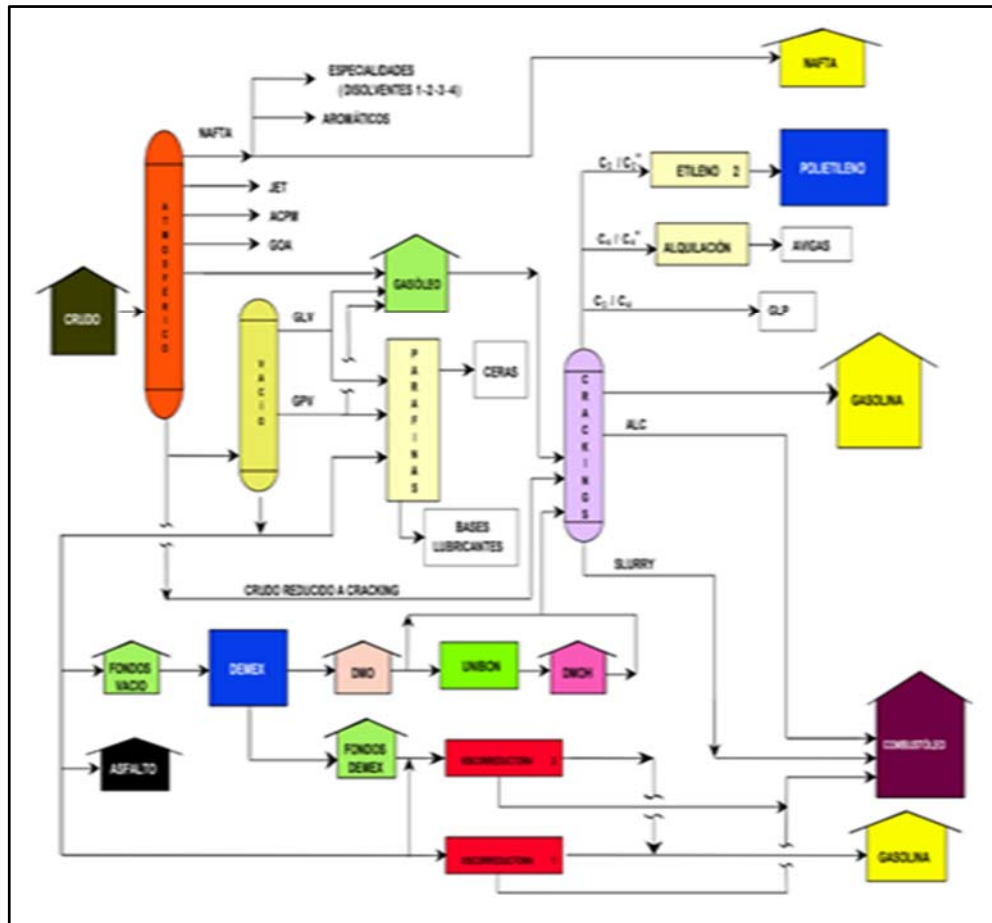
Figura 2. Organigrama de la Refinería de Barrancabermeja.



Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de calidad de Ecopetrol S.A. Bogotá D.C.: La Compañía, 2013. 85 p.

1.2.1 Gerencia General. Genera el programa detallado de operación de cargas y producciones para cada unidad y área de proceso de la Refinería, basado en el óptimo económico de la planeación acordada con las áreas corporativas de planeación.

Figura 3. Diagrama General de la Refinería de Barrancabermeja.



Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de procesos de Ecopetrol S.A. Bogotá D.C.: La Compañía, 2015. 135 p.

1.2.2 Gerencia de Producción. La Gerencia de producción está compuesta por diferentes departamentos, los cuales se describen a continuación.

1.2.2.1 Departamento de Materias Primas. Es la encargada de la entrega y recibo los crudos, para la preparación y suministro de la materia prima a las plantas de proceso, además mezcla y entrega los productos terminados, garantizando la disponibilidad de inventarios en tanques y efectúa el tratamiento de efluentes líquidos provenientes de los procesos de producción.

1.2.2.2 Departamento de Refinación de Crudos. Es la encargada de procesar el petróleo crudo, gasolinas naturales y fondos de vacíos, para producir productos terminados e intermedios, como materia prima de cracking y petroquímica.

1.2.2.3 Departamentos de Cracking Catalítico I, II, III. Procesa gasóleos, crudo reducido y fondos de vacíos tratados, para producir gasolinas de alto octanaje, aceite liviano de ciclo (ALC), gas licuado del petróleo (GLP), etano etileno, azufre y derivados como materia prima para otros procesos.

1.2.2.4 Departamento de Petroquímicas, Parafinas y Fenol. Maximiza el valor agregado del gas natural y algunos derivados del crudo mediante su transformación a productos petroquímicos para cubrir la mayor proporción del mercado.

1.2.2.5 Departamentos de Servicios Industriales Refinería y Balance. Generan los servicios industriales requeridos para la operación de la infraestructura operativa y administrativa.

1.2.2.6 Departamento de Mantenimiento. Establece las acciones de mantenimiento rutinario (proactivo y reactivo), encaminadas a mejorar la disponibilidad de los equipos para garantizar el cumplimiento de los compromisos de producción, administrar las herramientas y los inventarios de materiales para la producción.

1.2.3 Servicios Industriales Refinería. En estas unidades se generan los servicios industriales requeridos para los diferentes procesos, entre ellos:

- Tratamiento de Aguas.
- Generación de Vapor.
- Generación de Energía Eléctrica.
- Aire Comprimido.
- Distribución de gas combustible.

1.2.3.1 Tratamiento de Aguas. Es un proceso en el que se convierte agua cruda de una fuente natural, como el Río Magdalena o la ciénaga San Silvestre, en agua con características especiales (agua clarificada o industrial, agua filtrada, agua ultra filtrada, agua potable, agua desmineralizada para su uso en los diferentes procesos.

1.2.3.2 Generación de Vapor. Es un proceso de conversión de agua a vapor mediante el suministro de calor generado por la quema de un combustible (gas y/o líquido) y la transferencia de calor.

1.2.3.3 Generación de Energía Eléctrica. Es un proceso que convierte la energía potencial del vapor y de gases de combustión provenientes de la quema de gas natural en energía mecánica o de rotación para generar energía eléctrica.

1.2.3.4 Aire Comprimido. Es un proceso que toma aire del ambiente para ser comprimido, filtrado y secado para el accionamiento de herramientas o en instrumentación para el control de procesos.

1.2.3.5 Distribución de gas Combustible. Es un proceso que se basa en el recibo del gas natural de los campos de producción, la entrega y/o distribución del gas natural y combustible en la GRB.

1.3 HISTORIA DE LA UNIDAD

Con la reversión de Mares en el año de 1951 nace la Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol y en ese mismo año se empieza la construcción de las Calderas Foster B-901A/B/C/D con una capacidad de 132 KLB/H y los Turbogeneradores General TG-901/2/3 con una capacidad de 3,5 MW para suministrar servicios industriales a las unidades de proceso.

En 1964, para suplir la necesidad de la puesta en servicio de tres unidades adicionales y aumentar la capacidad de carga a 76 KBPD, se llevó a cabo el montaje de las Calderas Nuevas B-951/2 con una capacidad de 140 KLBH y los Turbogeneradores Siemens con una capacidad de 10 MW.

En este año se tenía una capacidad instalada de 808 KLBH de vapor y 30,5 MW de energía eléctrica.

En 1976 se llevó a cabo el montaje de las Calderas Central Norte B-2401/2/3 con una capacidad de 200 KLBH y el montaje de los TG-2401/2/3 con una capacidad de 10 MW cada uno.

En el año de 1978 se construyeron las B-2404/5 con una capacidad de 300 KLBH cada una. Para esta fecha se contaba con 15 calderas en servicio con una producción de vapor de 2.533 KLBH y ocho turbogeneradores con una producción de 60,5 MW.

En el año de 1971 se inicia el montaje de la unidad de aire comprimido con los compresores C-904/906 operados con motor eléctrico y el C-905 operado con motor diésel como compresor en caso de emergencia. Años más tarde se montan tres compresores más los C-907/08/09.

En el año 1976 se construye la unidad de aire comprimido de central norte con el montaje de los C-2401/02/04 operados con motor eléctrico y el C-2403 operado con motor diésel como compresor en caso de emergencia.

En el año de 1998 se inicia el cambio de compresores reciprocantes por compresores centrífugos y se realiza el montaje del C-910 que reemplaza al C-904. Para mejorar la confiabilidad y calidad del sistema de aire de instrumentos e industrial, se instalaron nuevos compresores centrífugos en el área de Central del Norte: C-2406/7/8, que reemplazaron los compresores reciprocantes C-2401/2/4; adicionalmente se repotencio el compresor C-2405.

En el área sur se repotenciaron los compresores centrífugos C-910 y C-911 y se desmantelaron los compresores reciprocantes C-906-7-8-9. Posteriormente, se dio inicio al PMSI –Vapor y Energía, durante el cual se instalaron las nuevas unidades de generación de vapor de media presión (150 psig) B-5120 y la HRSG (caldera recuperadora de gases) B-5100, se instalaron dos turbogeneradores TG-953/4 con

extracción de vapor de 165 psig y una generación de 20 MW bajo el sistema de “leasing”.

1.3.1 Cargas de la Unidad. La unidad recibe las siguientes cargas:

Tabla 2. Plantas Principales de la Refinería de Barrancabermeja.

Cantidad de Plantas	Plantas
5	Destilación Atmosférica de Crudo
4	Destilación al Vacío de Crudo
4	Ruptura Catalítica
2	Viscorreductora
1	Demex (Desasfaltado con Solvente)
1	Unibón (Hidrodesulfurización)
2	Generación de Hidrógeno
1	Alquilación (Avigas)
1	Ácido Sulfúrico
1	Aromáticos
1	Parafinas
1	Turboexpander
2	Etileno I y II
2	Polietileno
1	Nitrógeno
1	Plantas de Especialidades
3	Recuperación de Azufre
1	Tratamiento de Aguas Ácidas
1	Tratamiento de Aguas Residuales
2	Unidades de Servicios Industriales
1	Unidad de Cogeneración-Turbogas

1.3.1.1 Agua Cruda. La fuente principal de captación del agua cruda es el Río Magdalena. El agua se suministra a través de equipos de bombeo dispuestos sobre dos botes U-801 hacia los clarificadores ubicados en las Unidades 800 y 850. Se cuenta con la facilidad para recibir agua cruda del bote río que alimenta parcialmente la Unidad de Servicios Industriales de Balance.

La fuente hídrica de respaldo que alimenta el sistema de agua cruda de las Plantas de Agua U-800/850 proviene de la Ciénaga de San Silvestre mediante la interconexión del cabezal de agua de enfriamiento de sellos o de contra incendio con los cabezales de agua cruda de refinería.

1.3.1.2 Aire. El aire que se utiliza en el departamento se toma de la atmósfera y es filtrado antes de entrar a los compresores.

1.3.1.3 Gas natural. El gas natural que viene de los diferentes campos de producción, se utiliza como materia prima en los procesos de combustión para la generación de vapor y energía eléctrica.

1.3.2 Productos de la Unidad. Los productos de la unidad son:

- Agua Clarificada o Industrial.
- Agua Filtrada.
- Agua Ultra filtrada.
- Agua Potable.
- Agua Desmineralizada.
- Agua de Enfriamiento.
- Agua de Alimentación de Calderas.

- Vapor de Alta Presión (400 psi).
- Vapor de Media Presión (150 psi).
- Vapor de Baja Presión (50 psi).
- Vapor de Baja Presión (25 psi).
- Energía Eléctrica de Media Tensión (13.8 - 6,3. KV).
- Energía Eléctrica de Baja Tensión (480 – 220 -110 V).
- Aire Industrial.
- Aire de Instrumentos.

Tabla 3. Productos de la Unidad.

Producto	Destino
Agua Clarificada	Sistema Contraincendio, torres enfriadoras, proceso de filtración, Unidad de Ultrafiltración U-5400 y usos generales
Agua Filtrada	Alimentación U-5400.
Agua Ultrafiltrada	Pre tratamiento para la Unidad de Ósmosis Inversa U-5500 y para producción de agua potable
Agua Potable	Consumo humano en unidades de proceso de la Refinería y usuarios externos
Agua Desmineralizada	Sistema de generación de vapor en las calderas, generadores de vapor en unidades de proceso y cogeneradores
Agua de Enfriamiento	Intercambio de calor, en las unidades de proceso de petroquímica
Agua de Calderas	El agua de calderas se suministra a los diferentes usuarios de la unidad y de la refinería, para ser utilizada en generación de vapor, atemperamiento, entre otros.
Vapor de Alta Presión	Turbogeneradores y turbinas de la unidad y otras unidades de proceso de la refinería
Vapor de Media Presión	Equipos rotativos pequeños, calentamiento y torres despojadoras en las unidades de refinería
Vapor de Baja Presión	Desaireadores, precalentadores, calentadores y torres despojadoras en las unidades de refinería
Energía Eléctrica de Media Tensión	Equipos rotativos grandes movidos por motor
Energía Eléctrica de Baja Tensión	Equipo rotativo pequeño movido por motor, tomas de soldadura e iluminación y UPS
Aire Industrial	Usos generales y accionamiento de herramienta neumáticas
Aire de Instrumentos	Instrumentación neumática en plantas de proceso

1.4 PROCESO DE GENERACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

La unidad de aire industrial central sur tiene la capacidad instalada de 5.700 SCFM de aire atmosférico. En condiciones normales de operación solo estará en servicio uno de los dos compresores y el otro disponible, por lo tanto, la carga será aproximadamente 2.850 SCFM. La unidad de aire industrial central norte tiene la capacidad instalada para recibir una carga aproximada de 5.830 SCFM de aire atmosférico. La unidad de aire de instrumentos central norte tiene la capacidad instalada para recibir una carga aproximada de 10.600 SCFM de aire atmosférico.

La unidad de aire industrial central sur tiene la capacidad de producir aproximadamente 5.700 SCFM de aire industrial (seco), con un punto de Rocío de -40°C a presión atmosférica, de los cuales aproximadamente 400 SCFM son venteados a la atmósfera como aire de purga. En condiciones normales de operación solo estará en servicio uno de los dos compresores y el otro permanecerá en estado disponible, por lo que la producción normal será aproximadamente 2.450 SCFM de aire seco.¹⁰

La unidad de aire industrial central norte tiene una capacidad instalada para producir aproximadamente 5.830 SCFM de aire con un punto de Rocío de -40°C a presión atmosférica, de los cuales aproximadamente 410 SCFM son venteados a la atmósfera como aire de purga. La unidad de aire de instrumentos central norte tiene una capacidad instalada de 10.600 SCFM y normalmente produce aproximadamente 5.300 SCFM de aire Instrumentos, con un punto de Rocío de -40°C a presión atmosférica, de los cuales aproximadamente 371 SCFM son venteados a la atmósfera como aire de purga. En condiciones normales de

¹⁰ ECOPETROL S.A. Proyecto Plan Maestro de Servicios Industriales de la Refinería de Barrancabermeja (EPC3-AIRE). Barrancabermeja: La Compañía, 2015.

operación solo estará en servicio uno de los dos compresores disponibles, por lo que la producción normal será aproximadamente 4.930 SCFM de aire seco.

En condiciones normales de operación (cuando esté operando solo uno de los dos compresores C-2405 o C2406) el flujo de purga de la unidad de secado AD-2406A/B se debe ajustar a 420 SCFM. El aire de purga es aproximadamente el 7% del flujo de aire de entrada a los secadores.

Figura 4. Sección de Aire Comprimido Sur.

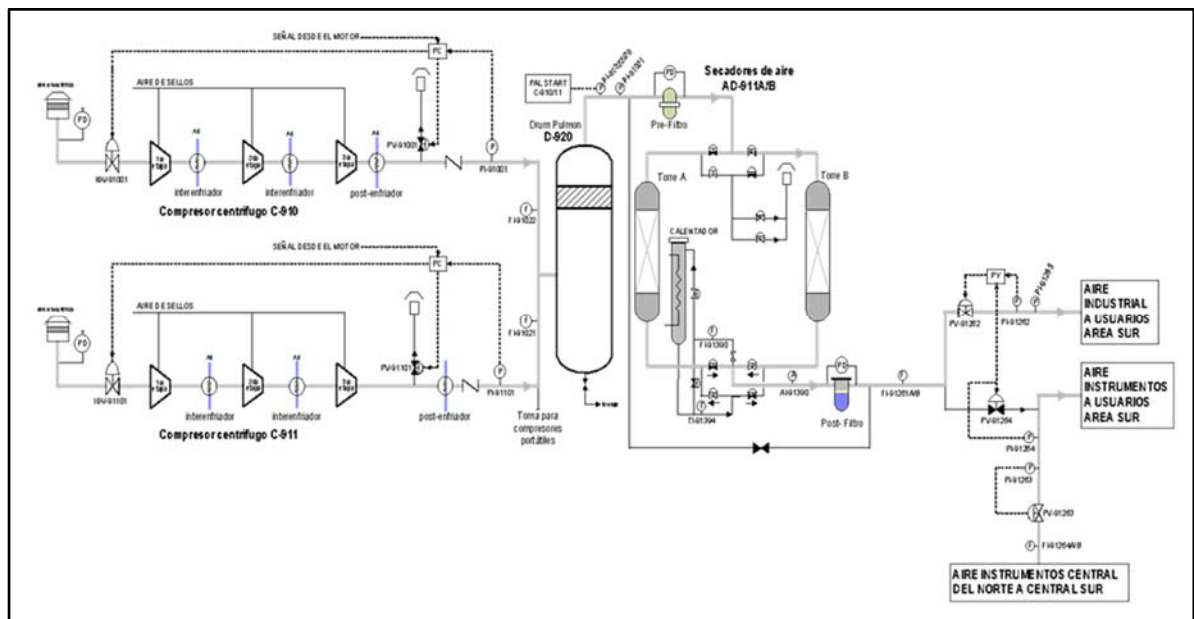
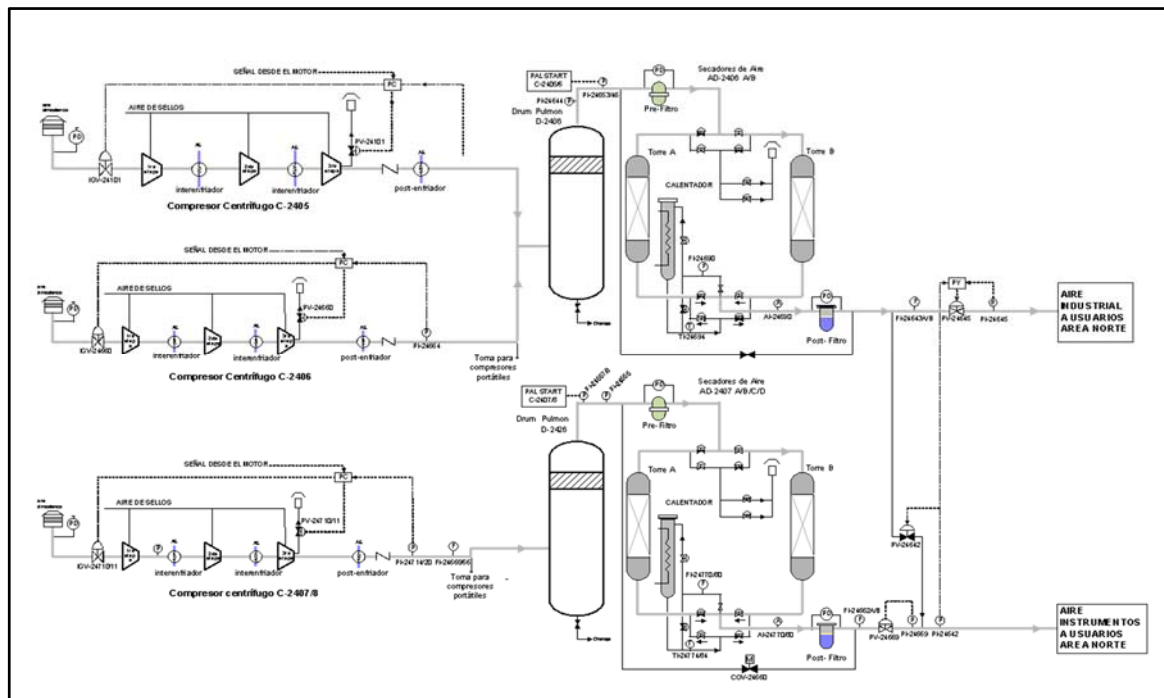
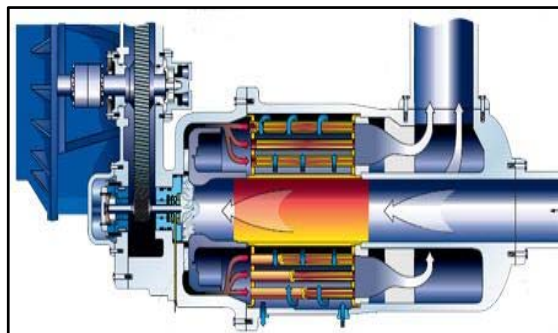


Figura 5. Sección de Aire Comprimido Norte.



Los compresores centrífugos de aire tanto del sistema de aire industrial, como del sistema de aire de instrumentos tienen una configuración similar a la que muestra la figura 6.

Figura 6. Configuración compresor centrífugo Centac.



Fuente: INGERSOLL RAND INC. Manual de Operación Compresor Centrífugo Ingersoll Rand Centac. Dublin, Irlanda: La Compañía, 2012. 241 p.

En la figura 6 se puede evidenciar un compresor de aire compacto, que cuenta con un multiplicador de velocidad de engranajes, un impulsor y un intercambiador de calor acoplado que permite enfriar el aire con agua después de la compresión entre las diferentes etapas. En la figura 7 se muestra una imagen de estos compresores y su configuración en la planta.

Figura 7. Compresores Sistema aire de instrumentos C2407 y C2408.



El sistema de aire instrumentos de la Unidad U-2400 alimenta a las siguientes plantas de la Refinería de Barrancabermeja:

- Calderas Central del Norte.
- Turbogeneradores.
- Planta Etileno.
- Planta Turboexpander.
- Polietileno I y II.
- Planta Aromáticos.
- UOP II.
- Torres enfriadoras TE-890/850.

- Planta de Parafinas.

En el área de la unidad U-900 existe una línea de respaldo de aire industrial a aire de instrumentos, donde alimenta a las áreas del sur de la Refinería de Barrancabermeja:

- Calderas Distral.
- Torres Enfriadora TE-831.
- Planta de Aguas.
- Unidad UFRO.
- Cracking modelo IV.
- U-200, U-250
- U-2000, U-2100.
- Orthoflow.
- Planta de soda.

Durante los últimos dos años de operación se han presentado múltiples fallas en los compresores centrífugos de aire del Departamento de Servicios Industriales, específicamente en los sistemas de compresión, lubricación, enfriamiento, instrumentación y eléctrico, evidenciando que su plan de mantenimiento no es el más óptimo para garantizar su disponibilidad y confiabilidad operacional.

Se requiere hacer un análisis de los modos de falla más frecuentes y de mayor impacto que se han presentado para generar una estrategia de mantenimiento costo-efectiva que les permita a los equipos operar dentro de las condiciones requeridas y evitando las paradas no programadas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el plan de mantenimiento de los compresores de aire del Departamento de Servicios Industriales de la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A, aplicando la metodología “RCM”.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar la información de diseño, operación y mantenimiento de los equipos que componen el sistema de compresión de aire.
- Determinar las funciones principales de los equipos del sistema de compresión de aire y realizar un análisis de los modos, efectos y consecuencias de falla asociado al contexto operacional de la unidad.
- Definir las tareas de mantenimiento y la frecuencia de ejecución requeridas para aumentar la confiabilidad operativa y disponibilidad del sistema de compresión de aire.
- Realizar un análisis económico comparativo entre la estrategia de mantenimiento actual del sistema de compresión de aire respecto a la propuesta realizada utilizando la metodología RCM.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El Departamento de Servicios Industriales de la Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A., en búsqueda de mejorar la disponibilidad y confiabilidad operativa de sus activos, requiere optimizar la estrategia de mantenimiento de los compresores de aire de las Unidades U-900 y U-2400 debido a las múltiples fallas que se han presentado de manera frecuente en estos equipos y al impacto económico que representan sus paradas no programadas.

El consumo de aire comprimido en las diferentes plantas de la refinería es constante y permanente debido a sus múltiples usos. A continuación, se muestra el consumo promedio mensual, tanto de aire industrial como de aire de instrumentos, en las unidades U-900 y U-2400:

Figura 8. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-900.

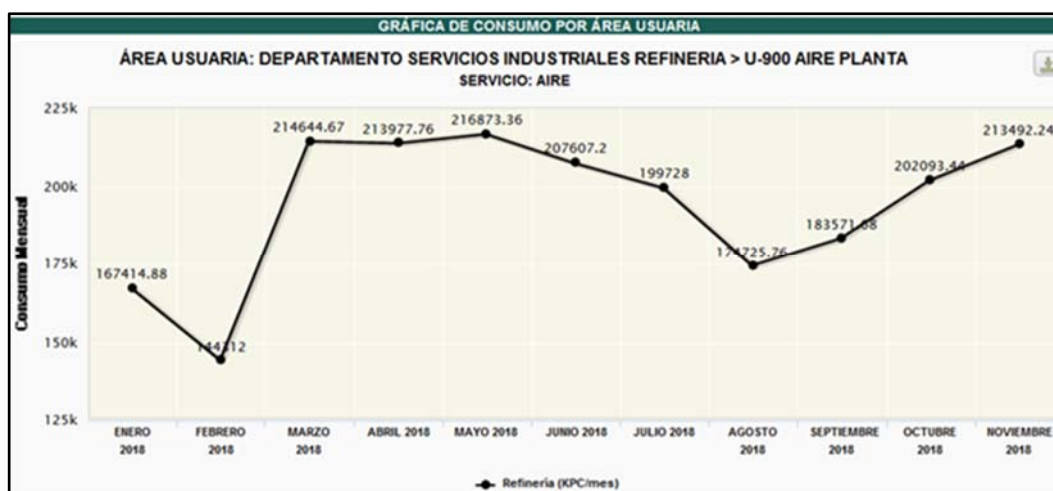


Figura 9. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-900.

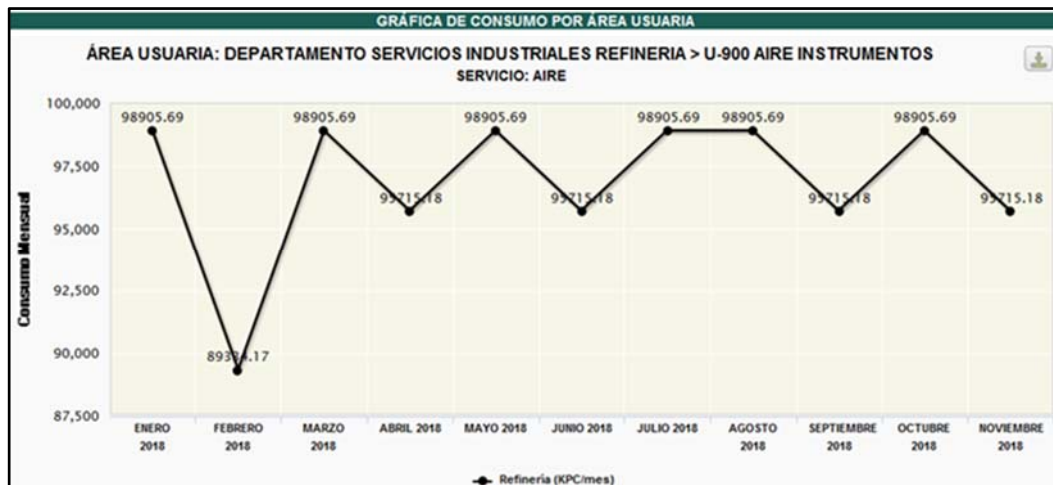


Figura 10. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-2400.

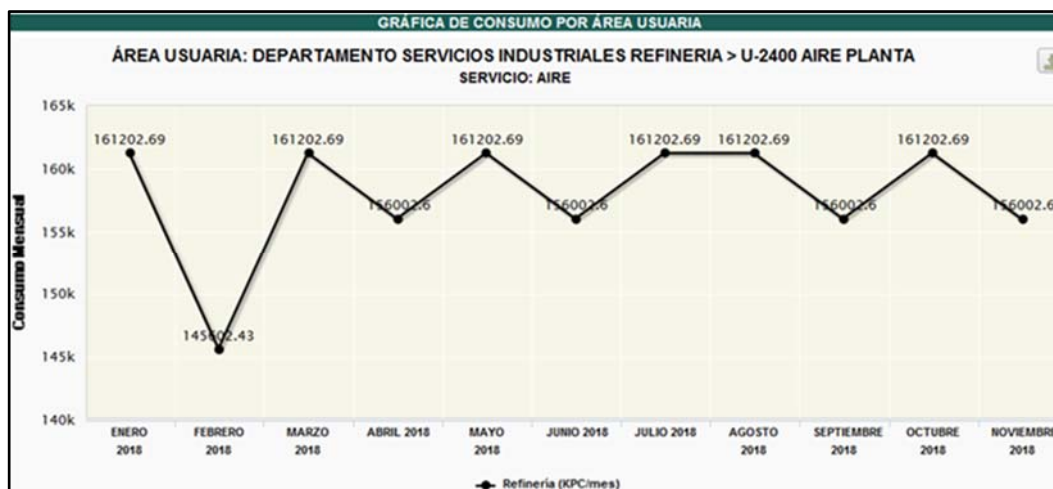
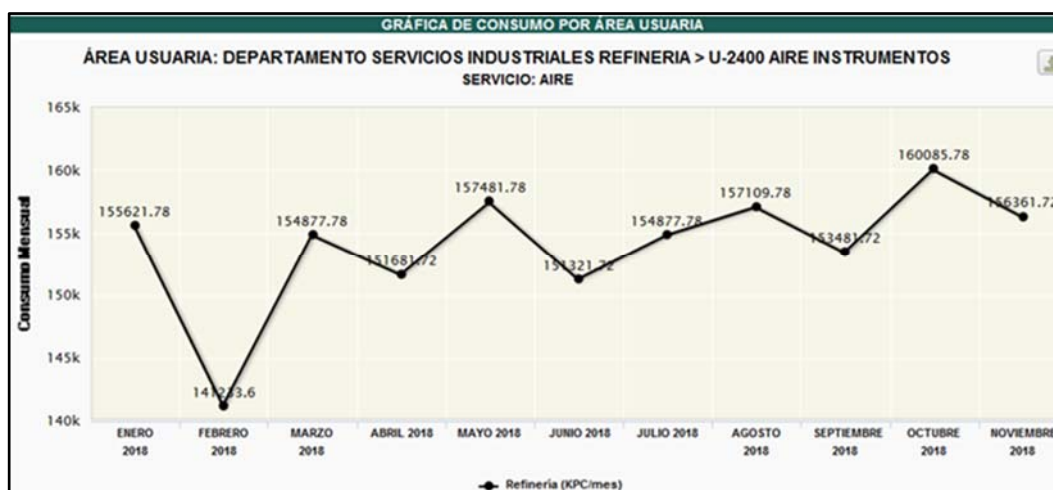


Figura 11. Consumo mensual de aire industrial y de instrumentos U-2400.



El Departamento de Servicios Industriales Refinería tiene definidas las tarifas para cada uno de los servicios ofrecidos, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Tarifas Servicios Industriales Refinería 2018.

TARIFAS SERVICIOS INDUSTRIALES 2018		
SERVICIOS INDUSTRIALES	UNIDADES	TARIFAS
H2O AGUA CAPTACION	\$/KGI	1350
H2O AGUA CLARIFICADA	\$/KGI	6892
H2O AGUA POTABLE	\$/KGI	15870
H2O AGUA INDUSTRIAL	\$/KGI	203
H2O AGUA CALDERAS	\$/KGI	15982
H2O AGUA CONTRAINCENDIO	\$/KGI	1425
VAPOR	\$/KLB	8870
ENERGIA DISPONIBLE	\$/KW	126
AIRE	\$/KPC	3254

Según lo anterior, la U-900 distribuye en promedio alrededor de 231 SCFM de aire comprimido mensualmente, mientras que la U-2400 distribuye en promedio 312

SCFM. Esto representa, en términos económicos, alrededor de \$1.964.302 mensuales entre las dos unidades.

Una falla en alguno de los compresores centrífugos de aire mencionados anteriormente reduce la disponibilidad del aire requerido por las plantas de proceso. Uno de los mayores impactos de estas fallas puede reflejarse en la no operación de la instrumentación neumática asociada a algunos equipos críticos de las plantas de Refinación de Crudos, Craqueo Catalítico y Petroquímica, las cuales se alimentan del aire comprimido producido por el Departamento de Servicios Industriales.

El presente trabajo pretende optimizar la estrategia de mantenimiento actual de los compresores de aire de las unidades U-900 y U-2400 mediante la implementación de la metodología RCM, teniendo en cuenta los modos de falla que se presentan con mayor frecuencia y que producen un mayor impacto sobre estos equipos.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad R.C.M. El mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM por su denominación anglo (Reliability Centered Maintenance) se originó en las industrias aeronáuticas y nucleares a fines de los años 60, con el fin de reducir sus elevados costos en mantenimiento.

A mediados de 1973 el departamento de defensa de los estados unidos incorporó conceptos y métodos de RCM en varias aplicaciones militares. Los señores Stanley Nowlan y Howard Heap escribieron un documento comprensivo sobre las relaciones entre mantenimiento, confiabilidad y seguridad, donde le dieron el título “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad” (“Reliability Centred Maintenance”). Este informe fue publicado en 1978 y aún es uno de los documentos más importantes en la historia de la gestión de activos.

En la década de los 80 el RCM empezó a extender su horizonte de aplicación y es así cómo se tomó a la industria como nuevo foco, en el cual las maquinarias requerían de un sistema que aplicado a ellos pudiera dar mayor capacidad operativa y disminuir la cantidad de fallas.

John Moubray dijo: “El mantenimiento centrado en confiabilidad es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo

físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”.¹¹

Antes de comenzar a analizar los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos de cualquier organización, se necesita saber qué activos se tratan y decidir cuáles de ellos serán sometidos al proceso de revisión de RCM. De esa forma se pueden asignar los medios económicos, los que irán dirigidos a sacar el mayor provecho posible, evitando los despilfarros y haciendo más eficiente el uso de recurso humano, insumos de mantenimiento, planificación, entre otros.

Las decisiones que se pueden tomar en cuanto a las estrategias de mantenimiento están dadas por las consecuencias de las fallas y los recursos asignados. Algunas de las estrategias que puede tomar la organización en la práctica pueden ser:

- **Reacondicionamiento Cíclico:** consiste en recomponer la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independientemente de su condición en ese momento.
- **Sustitución Cíclica:** consiste en descartar un elemento o componente antes o en el límite de edad definida, independientemente de su condición en ese momento.
- **Tareas a condición:** consisten en chequear si hay fallas potenciales a través del mantenimiento predictivo, para que se pueda actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional.

¹¹ MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 446 p. ISBN 09539603-2-3.

- **Acciones a Falta de:** las acciones a falta de, son las que se toman cuando en los casos de fallas de seguridad o medio ambiente no hay tareas proactivas que reduzcan en forma considerable y aceptable sus consecuencias, en este caso el rediseño es una acción a falta de.

Durante el proceso de ejecución RCM, se deben separar las fallas evidentes de las fallas ocultas. Las fallas evidentes son aquellas fallas eventualmente e inevitablemente se harán evidentes por sí solas a los operarios en circunstancias normales y esto ocurre a través de alarmas sonoras, consumo extra de energía, mala calidad del producto, humo, olores extraños, etc.

Por otro lado, también existen las fallas ocultas, las cuales no se hacen evidentes por sí solas a los operarios en circunstancias normales. Las fallas ocultas pueden también puede ocasionar consecuencias de seguridad, medioambiente, operacionales y no operacionales.

Los modos de falla incluyen aquellas fallas que han ocurrido en equipos similares, que actualmente estén siendo prevenidas mediante algún tipo de mantenimiento, así como fallas que aún no ha ocurrido, pero es muy probable que ocurran en el contexto operacional.

Generalmente para establecer los modos y sus efectos de fallas, el RCM utiliza dos metodologías muy acertadas: El Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF) o FMEA por sus siglas en inglés, y el árbol lógico de decisión ALD.

- **Análisis De Modos Y Efectos De Fallas (AMEF):** su propósito ayudar al usuario a determinar los efectos y las consecuencias de los modos de falla del componente del sistema o activo.

- **Árbol Lógico de Decisión (ALD):** ayuda a seleccionar las actividades de mantenimiento requeridas para evitar que los modos de falla se manifiesten durante la operación de un activo.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se definen los pasos que sugiere la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para diseñar una estrategia de mantenimiento que permita garantizar la confiabilidad operativa de los activos de una empresa.

4.2.1 Metodología R.C.M. Para la realización de un RCM se deben formular las siete Preguntas Básicas que se mencionan a continuación:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño deseados del equipo en su contexto operacional (funciones)?
2. ¿De qué forma puede fallar y no cumplir con sus funciones (fallas funcionales)?
3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla (efectos de falla)?
5. ¿En qué forma afecta cada falla (consecuencia de falla)?
6. ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus intervalos)?
7. ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva no previene la falla (acciones por omisión)?¹²

¹² VALDERRAMA, María del Pilar. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2018.

Las anteriores preguntas son el pilar fundamental para conocer las claves del procedimiento de RCM y que dan respuestas a los conceptos que se abordan para el análisis como son las Funciones y Parámetros de Funcionamiento, Fallas Funcionales, Modos de Falla, Efectos de Falla y Consecuencias de Falla.

- **Funciones:** son los parámetros de funcionamiento que debe cumplir la maquinaria y que son los que los usuarios quieren que cumpla.
- **Fallas Funcionales:** según John Moubray define las Fallas Funcionales de la siguiente manera: “La incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario”.¹³
- **Modos de Falla:** el paso siguiente es tratar de identificar los modos de falla que tienen más posibilidad de causar la pérdida de una función.

Un modo de falla podría ser definido: “como cualquier evento que puede causar la falla de un activo físico (o sistema o proceso).¹⁴

Estos se deben describir de la mejor forma posible, pero también se debe tener cuidado en el grado de profundidad de la indagación de datos generada, de tal modo de no gastar información sin valor.

- **Efectos de Falla:** los efectos de falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla. Los analistas deben describir en qué forma se evidencia la falla para que los resultados de la metodología ataquen directamente y de manera más eficaz los efectos de falla.

¹³ MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 446 p. ISBN 09539603-2-3.

¹⁴ *Ibíd.*

- **Consecuencias de Falla:** son aquellas que miden el nivel de importancia de los efectos de las fallas. Las consecuencias pueden ser perjudiciales para la seguridad (personas), el medio ambiente, la producción, calidad del producto, servicio al cliente, entre otras.

4.2.2 Tareas de mantenimiento proactivas. El análisis RCM arroja una serie de tareas o actividades de mantenimiento a ejecutar en los activos, equipos o sistemas que ayuden a manejar, disminuir o eliminar las posibles fallas que se puedan presentar.

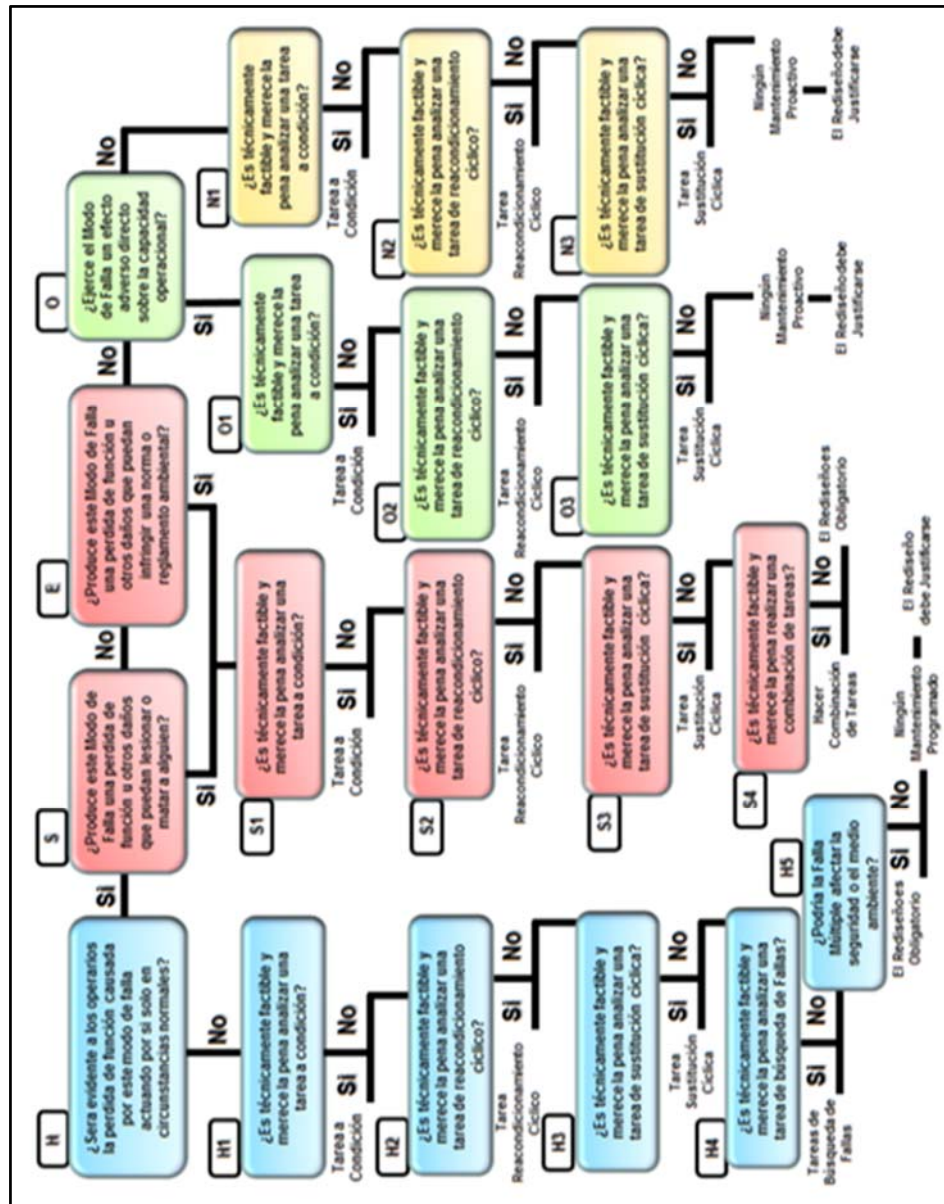
- **Tareas de predictivas:** son aquellas tareas de monitoreo en línea y análisis de condición de los equipos o sistemas.
- **Tareas preventivas:** son aquellas tareas que buscan recuperar condición de los equipos, ya sea a través del cambio de partes o repuestos, durante una parada programada.

4.2.3 Diagrama de decisión RCM. Finalmente, el análisis RCM termina con el diligenciamiento de las Hojas de Decisión, las cuales permiten acentuar las respuestas formuladas en el árbol lógico de decisión y en función de dichas respuestas permiten registrar:

- Las actividades de mantenimiento rutinario serán realizadas, con qué frecuencia se realizan y quién lo hará.
- Las fallas son lo suficientemente serias como para justificar un rediseño.
- Algunos casos en los que se toman la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran.

A continuación, se presenta el árbol lógico de decisión para las tareas de estrategias de mantenimiento del RCM, el cual presenta la gama de alternativas que se pueden tomar al aplicar la metodología al activo físico.

Figura 12. Árbol Lógico de Decisión RCM.



Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 446 p. ISBN 09539603-2-3.

4.2.4 Compresores. Un compresor es 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 variadas exigencias de aplicaciones industriales, comerciales y domésticas. Los más conocidos son:

Desplazamiento positivo:

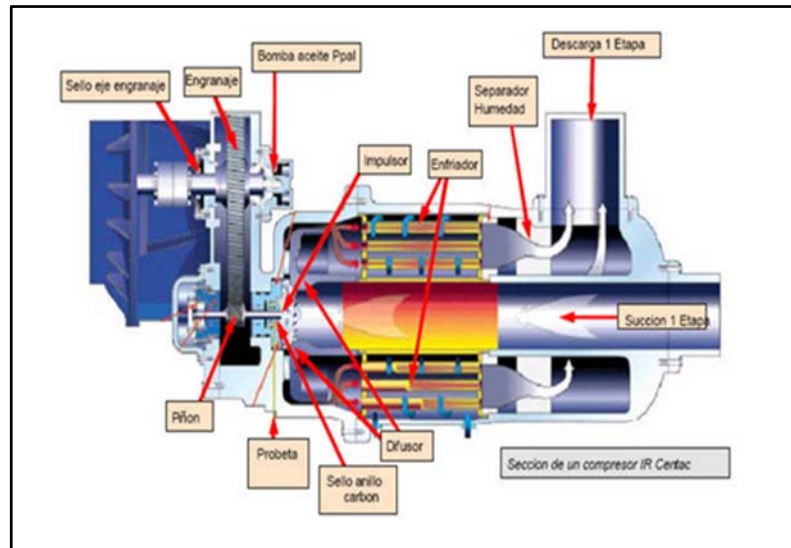
- Compresores de pistón.
- Compresores de tornillo.
- Compresores de paletas.
- Compresores de lóbulos o émbolos rotativos.
- Compresores scroll.
- Bombas de vacío.

Dinámicos:

- Compresores centrífugos axiales.
- Compresores centrífugos radiales.

4.2.5 Compresores centrífugos. Son dispositivos dinámicos que intercambian de forma continua momento angular entre el elemento rotativo (rodete) y el flujo de vapores de refrigerante. Cuando las moléculas del fluido son aceleradas por la fuerza centrífuga, avanza y son sustituidas. El efecto global es el de una continua compresión del caudal de vapor.

Figura 13. Componentes de un compresor centrífugo.



Fuente: INGERSOLL RAND INC. Manual de Operación Compresor Centrífugo Ingersoll Rand Centac. Dublin, Irlanda: La Compañía, 2012. 241 p.

4.2.5.1 Rotor. Es el mecanismo que incrementa la energía cinética del fluido absorbiendo energía mecánica del eje. La energía mecánica se emplea en vencer el par resistente que provoca la diferencia de presión entre las caras de la paleta.

4.2.5.2 Rodamientos. Las cargas axiales son absorbidas por cada piñón a través de un rodamiento axial hidrodinámico. Los rodamientos axiales están diseñados para maximizar la capacidad de absorción de carga y al mismo tiempo minimizar las pérdidas de potencia.

4.2.5.3 Sellos. Un sello mecánico es un dispositivo de sellado que previene el escape de un fluido de un recipiente, al cual atraviesa un eje rotativo, realizando el sellado por el contacto axial de sus caras.

4.2.5.4 Difusores. La misión es recuperar una parte de la energía cinética a la salida del impulsor, o lo que es lo mismo, conseguir mejorar el rendimiento posible, a expensas de la energía cinética que crea el impulsor, un incremento adicional de presión.

4.2.5.5 Inter-enfriadores ES-BASCO. Los enfriadores tipo ES (Extended Surface Plate Fin). Su diseño compacto ofrece mayor enfriamiento de grandes volúmenes de aire con bajas caídas de presión, dando como resultado menor consumo de energía. Los enfriadores son del tipo de agua que pasa por los tubos.

4.2.5.6 Motor Principal. Es un motor eléctrico, el cual está montado y directamente acoplado a través de un acople flexible al engranaje principal del compresor. Para garantizar un rendimiento apropiado del paquete compresor.

4.2.5.7 Sistema de Lubricación. El sistema de lubricación del compresor está diseñado para proporcionar aceite limpio a los cojinetes ya los engranajes del compresor para su debida operación.

4.3 COMPRESOR CENTRÍFUGOS SERVICIOS INDUSTRIALES REFINERÍA

4.3.1 Descripción de la Máquina. Los compresores utilizados en la planta de servicios industriales son compresores centrífugos libre de aceite accionado por un motor eléctrico, Marca Siemens de 700 a 1500 HP a 3600 rpm.

El compresor y el motor son directamente acoplados, mediante un acople flexible, No Lubricado y la unidad completa es montada sobre una base común, con su sistema propio de lubricación, sistemas de control y sistemas auxiliares.

El paquete compresor contiene:

- Un motor eléctrico principal que acciona un engranaje principal común para todas las etapas de compresión.
- Etapas de compresión de tres etapas que consiste de un impulsor montado sobre su propio eje y dentro de una carcasa de hierro fundido.
- Rotores que consisten de un piñón integral accionado a su velocidad óptima por el engranaje principal común.
- Dos inter-enfriadores que se encuentran instalados entre etapas de compresión.
- Un separador de humedad y un sistema de remoción de humedad instalado después de cada enfriador.
- Se cuenta con un post-enfriador instalado en el paquete.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1 CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO RCM

El equipo de trabajo se conformó con el fin de poder dar respuesta a las siete preguntas fundamentales del RCM, las personas escogidas tienen experiencia, son especialistas, tienen conocimiento de los activos y procesos de la empresa.

El equipo estuvo formado de la siguiente manera:

- **Personal de operaciones:** estas personas escogidas se destacan porque son las encargadas de velar por su control, operación y funcionamiento del activo. Son personas que actualmente laboran los cuales llevan varios años al frente de estos activos.
- **Personal de Mantenimiento:** estas personas son expertas en labores de mantenimiento y reparaciones de equipos rotativos, los cuales hicieron parte instrumentistas, eléctricos y mecánicos.
- **Personal de confiabilidad:** este personal administra información técnica del equipo, historial de fallas, paradas no programadas, intervenciones, plan de mantenimiento y costos del equipo.

5.1.1 Relación Costo vs Beneficio. Según la metodología de RCM ECP-GCM-G-004 de Ecopetrol, lo cual exige que se analice el indicador de efectividad (MEI) con el fin de determinar si las tareas propuestas en el RCM son costo efectivas, se realizó un acercamiento a esta práctica mediante la utilización de la relación costo beneficio (RCB).

Se definieron ecuaciones de pérdida para los eventos en los cuales se generen impactos en producción por la falla de un equipo en cada Planta o Unidad, y teniendo en cuenta los grados de redundancia instalados.

De esta manera se aseguró que se seleccionara la combinación de tareas de mantenimiento más viable en cuanto a costo-efectividad.

$$RCB = \frac{\text{Costo con Mtto (TBT y CMT)}}{\text{Costo sin Mtto}}$$

Tenemos,

$$RCB = \frac{[(\$EP_{CMT} + \$HH_{CMT}) * t_{CMT} * n_{CMT}] + [(\$EP_{TBT} + \$HH_{TBT}) * t_{TBT} * n_{TBT}]}{[(\$EP_{FALLA} * T_{FALLA}) + (\$HH_{CORR} * t_{CORR})] * N_{FALLAS}}$$

Donde:

$\$EP_{CMT}$, es el costo de la ecuación de pérdidas sobre las tareas de monitoreo de condición.

$\$HH_{CMT}$, es el costo de la hora hombre de ejecución de la tarea de monitoreo de condición.

t_{CMT} , es el tiempo de ejecución de la tarea de monitoreo de condición.

n_{CMT} , es el número de tareas de monitoreo de condición, en el tiempo de análisis de evaluación de la estrategia.

$\$EP_{TBT}$, es el costo de la ecuación de pérdidas sobre las tareas de mantenimiento basadas en tiempo.

$\$HH_{TBT}$, es el costo de la hora hombre de ejecución de la tarea de mantenimiento basada en tiempo.

t_{TBT} , es el tiempo de ejecución de la tarea de mantenimiento basada en tiempo.

n_{TBT} , es el número de tareas de mantenimiento basada en tiempo, durante el tiempo de análisis de evaluación de la estrategia.

$\$EP_{FALLA}$, es el costo de la ecuación de pérdidas sobre las tareas de monitoreo de condición.

T_{FALLA} , es el tiempo total de parada por la materialización de un modo de falla.

$\$HH_{CORR}$, es el costo de las horas hombre gastado para la reposición del equipo a su estado funcional.

t_{CORR} , es el tiempo gastado para la reposición del equipo a su estado funcional.

N_{FALLAS} , es el número probable de fallas que se tendrán asociadas al modo de falla, en el tiempo de análisis de evaluación de la estrategia.

5.1.2 Ecuación de Pérdidas. La metodología RCM determina la efectividad de la estrategia de mantenimiento mediante la utilización del indicador RCB (Relación Costo Beneficio) definido en el punto anterior, para lo cual se hace necesario la cuantificación de los efectos, con lo que se mide el costo de las pérdidas ocasionadas por la parada de una planta, sistema o equipo, teniendo en cuenta los grados de redundancia instalados, las capacidades de almacenamiento y los índices de productividad y mantenibilidad.

La ecuación de pérdidas para el sistema de compresión de aire de los compresores centrífugos del departamento de servicios industriales refinería de Barrancabermeja está enmarcada por las siguientes consideraciones:

La generación de aire en la refinería se considera autónoma y suficiente según los balances másicos del proyecto, por lo tanto se estima que la perdida de algunas secciones de la unidad puedan salir de servicio sin afectar en forma inmediata la operación de la refinería, pero se tienen secciones de la planta como los cabezales de distribución de los servicios, que en el evento de la rotura del mismo sacaría de servicio la refinería por la no posibilidad de continuar suministrando el fluido ó servicio a las plantas de la refinería, evento en el cual la pérdida económica seria de 215.750 US/hr. Cabezal de vapor de alta presión (HPS), cabezal de agua de alimentación a las unidades de desmineralización.

Tabla 5. Pérdida económica del sistema de compresión de aire.

Tiempo [hrs]	Unidad de compresión Parada [Dólares/hr]
0 - ∞	215.750,00

5.1.3 Costo Hora – Hombre.

Tabla 6. Tarifas HH (Labour Rate).

ESPECIALIDAD	COSTO (US\$32.00/HORA)
CRAFTMAN	32
OPERATOR	32
STAFF	32
CONTRACTOR	32
INSTRUMENT	32

El costo de la Hora – Hombre para la elaboración del Análisis de Costo – Efectivo, se definió de la siguiente manera:

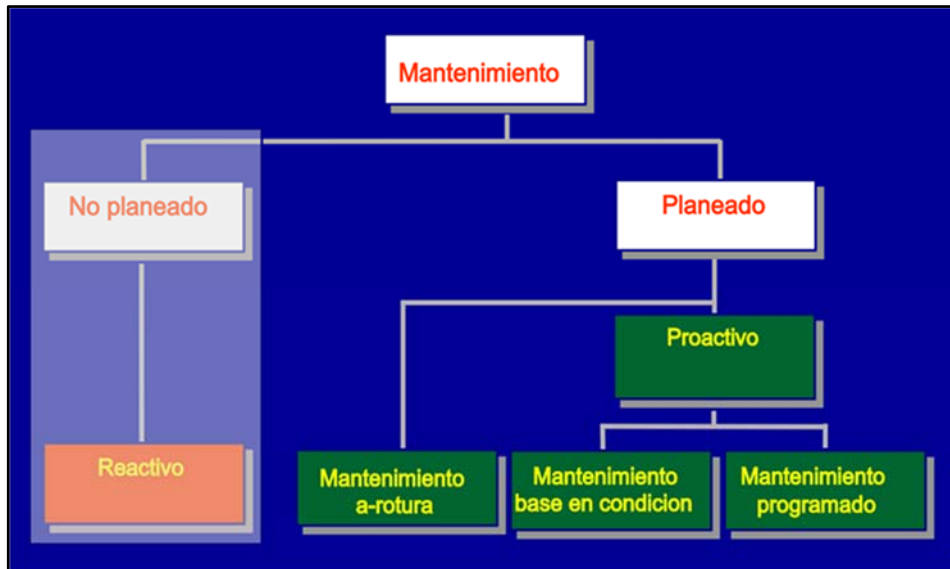
Según información suministrada por el Departamento de paradas de planta, el valor de la hora hombre para presupuesto es COP \$78000 y si es hora hombre a través de un contratista está alrededor de \$146.000. Para efectos de estudio se unificó la tarifa HH (hora/hombre) para todas las especialidades de ECOPETROL y contratista, fijándose una tarifa de US\$ 32.00 / hora.

Las tarifas mostradas en la Tabla 6 se utilizaron como costos “standard” de mano de obra para el análisis.

5.2 ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO ÓPTIMA

La estrategia de mantenimiento obtenida por el estudio de RCM de los activos para cumplir las funciones del sistema de compresión de aire del departamento de servicios industriales refinería, se basa en la filosofía de trabajar con un mantenimiento planeado, minimizando el mantenimiento no planeado o reactivo. Ver figura 14.

Figura 14. Opciones de Mantenimiento.



Fuente: GAMBOA, Ingrid. Mantenimiento de plantas. [En línea]. [Consultado el: 10 de junio de 2019]. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/15549389>

El mantenimiento planeado incluye trabajar equipos a falla, para los casos donde técnicamente no es factible el mantenimiento proactivo por su característica aleatoria de falla o el proceso de degradación es súbito, o si el mantenimiento proactivo posible es más costoso que la reparación del equipo cuando falle. En este análisis se incluye las pérdidas de producción (generalmente bajas) y se analiza la eficacia de las tareas preventivas propuestas.

El mantenimiento planeado Proactivo contiene dos grandes grupos:

- **Mantenimiento Programado:** incluye las tareas que se programan para realizarse de acuerdo a una frecuencia de tiempo establecida (tareas tipo TBT) y las cuales generalmente no requieren de inspección.

- **Mantenimiento por Condición:** incluye las tareas que se deben ejecutar una vez se ha realizado un análisis de la información de un monitoreo de la condición (tareas tipo CBT). En este tipo de tareas también se incluye todas las rutas de monitoreo y rutas del operador (tareas tipo CMT) que obedecen a un programa de seguimiento de la condición de los equipos.

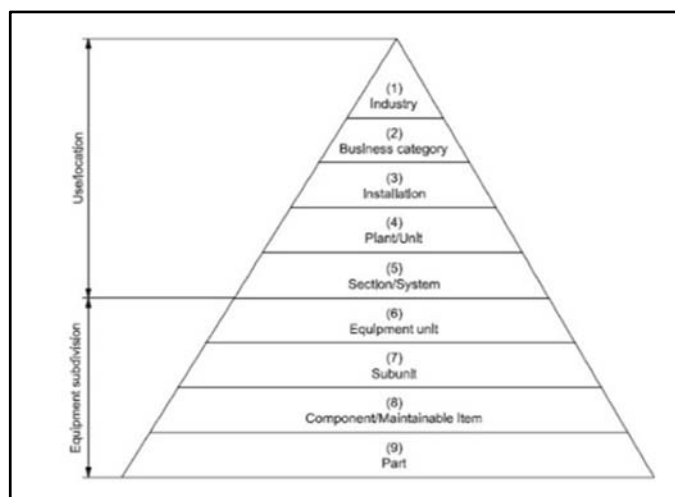
6. TAXONOMÍA

La Norma Internacional ISO 14224 es de gran importancia para registrar actividades y experiencias, recolección de datos y clasificación de fallas aplicando conceptos con límites y jerarquías.

Tomando como referencia este concepto para los compresores centrífugos del departamento de servicios industriales refinería, se debe realizar una clasificación de todas sus partes o componentes, comenzando desde lo macro de la planta hasta llegar a lo más mínimo del equipo, distinguiendo las partes y componentes que entregan a menos una función principal.

Según la anterior idea la clasificación del sistema de compresión se realiza bajo la norma ISO 14224 que se presenta a continuación.

Figura 15. Taxonomía.

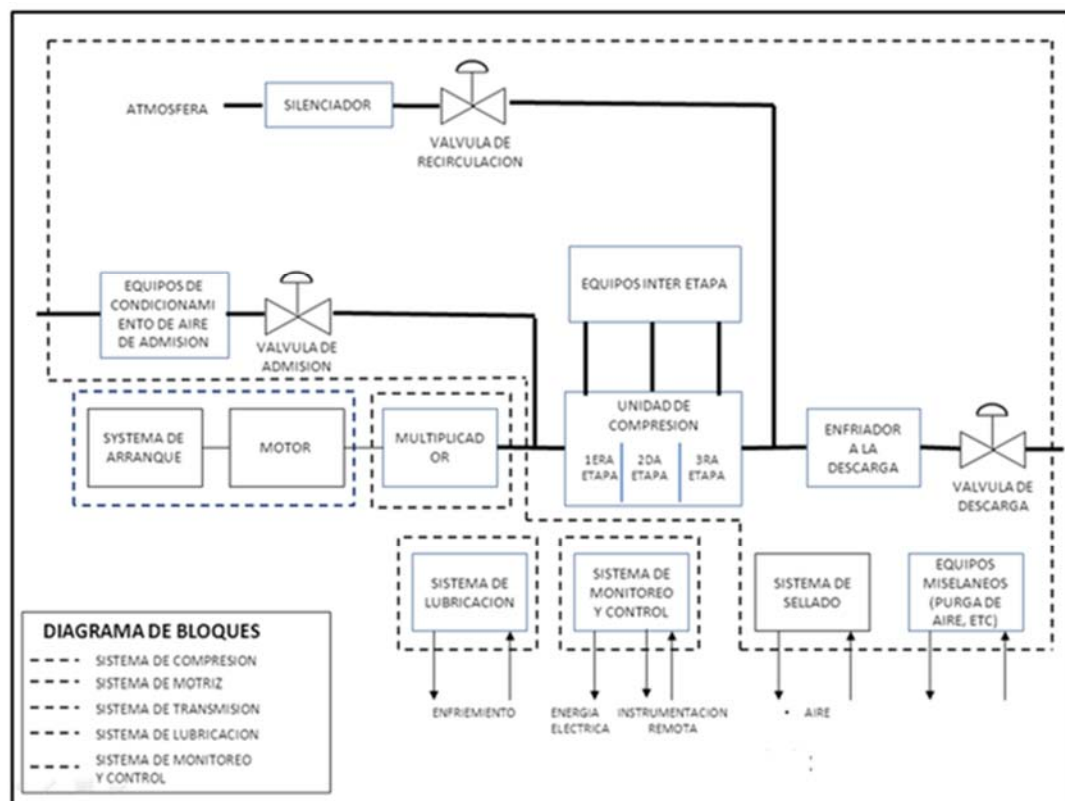


Fuente: INTERNACIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224. 2 ed. Ginebra: ISO, 2006. 178 p.

6.1 DESCRIPCIÓN DE FRONTERAS

Para realizar la jerarquización y frontera del sistema de compresión de los compresores centrífugos de aire del departamento de servicios industriales refinería, Nos guiaremos por la norma ISO 14224, esta norma nos indica que se debemos ser precisos en la delimitación para poder recolectar, fusionar y analizar la información en la figura 16; se realiza la frontera del sistema de compresión.

Figura 16. Frontera sistema de compresión.



Fuente: INTERNACIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224. 2 ed. Ginebra: ISO, 2006. 178 p.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ANALIZADO

El estudio corresponde al Sistema de Compresión de aire del departamento de servicios Industriales refinería considerado crítico de acuerdo a la evaluación funcional previa realizada por la Refinería de Barrancabermeja.

El sistema de compresión de aire del departamento de servicios industriales refinería succiona el aire de la atmósfera, el cual pasa a través de un filtro para la retención del material particulado con el propósito de proteger los internos del compresor.

El sistema de compresión es accionado con un motor Siemens que transforma la energía eléctrica de 6300 Volts a energía mecánica a una velocidad de 3600 RPM y potencia entre 800 HP y 1500 HP. Esta energía es transferida directamente al compresor centrífugo a través de un acople flexible.

El compresor cuenta con un sistema de protección anti oleaje, protección y monitoreo remoto de velocidad y desplazamiento.

El sistema de compresión requiere un flujo de agua de 150 GPM a 60 Psig y 90 °F para enfriar el flujo de aire inter etapas y un flujo de agua de 111.2 GPM a 74.7 Psia y 90 °F para enfriar un flujo de aceite de 28.2 GPM a 85.7 Psia, desde una temperatura de 155.5 °F a 120 °F.

El compresor cuenta con un sistema de monitoreo y control que tiene la función de controlar todas las funciones del sistema de compresión, respondiendo a las necesidades en el momento se requieran del sistema. El subsistema está conformado principalmente por un control local Bently Nevada, en el cual se monitorea la vibración y temperatura y un control lógico de procesos Allen Bradley (PLC).

El aire comprimido, sale del compresor a 110 psig, 105°F y 100% de humedad relativa. luego descargan hacia a un tambor acumulador para posteriormente ingresar a la unidad de secado. A la salida de las unidades de secado, el aire presenta un punto de rocío de -40°F (punto de rocío definido a condiciones de presión atmosférica), para salir a los cabezales correspondientes.

Para facilitar el análisis el sistema fue dividido en subsistemas configurados de la forma en que se muestra a continuación.

6.2.1 Subsistema de compresión. Tiene como función entregar un flujo de aire desde el ambiente a una presión de 14.7 Psia y una temperatura de 95 °F y a la red de aire de instrumentos a una presión de 105 Psig y una temperatura de 100 °F, manteniendo el aire bajo el estándar de calidad ISO Clase 0 (100% libre de aceite en conformidad con la norma ISO 8573-1 2010) y confinado de manera segura al igual que los fluidos de lubricación y refrigeración.

Está conformado principalmente por un compresor de tres etapas, el cual poseen sistemas auxiliares de sellado, enfriamiento, lubricación y monitoreo que le permiten realizar su función al menor riesgo posible, el sistema debe mantener el aire confinado de manera segura. Los equipos principales que conforman este subsistema son listados en la tabla 7.

Tabla 7. Listado de equipos del Subsistema de compresión.

#	DESCRIPCIÓN EQUIPO
1	COMPRESOR DE AIRE
2	VÁLVULA REGULADORA DEL SISTEMA DE SELLADO
3	VÁLVULA DE ALIVIO DEL SISTEMA DE SELLADO
4	VÁLVULA DE SUCCIÓN DEL COMPRESOR

6.2.2 Subsistema Motriz. La función principal de este subsistema es suministrar el movimiento y la potencia requerida por el compresor para cumplir su función, el componente principal es un motor Siemens que transforma la energía eléctrica de 6300 Voltios a energía mecánica a una velocidad de 3600 RPM con una potencia en el eje. El motor cuenta con un sistema de protección y monitoreo remoto de temperatura.

Tabla 8. Listado de equipos del Subsistema de Motriz de los Compresores.

#	DESCRIPCIÓN EQUIPO
1	MOTOR DEL COMPRESOR DE AIRE

6.2.3 Subsistema de Lubricación. La función principal es suministrar aceite lubricante (ISO VG 32) al sistema de compresión, limpio según los requerimientos de la norma ISO 4406, a un caudal de 28.2 GPM, 85.7 Psia y 120 °F. Este sistema está conformado principalmente por un reservorio atmosférico, con capacidad para 552 galones de aceite, filtros de 10 micrones, dos (2) bombas IMO PUMP una principal y una auxiliar que manejan cada una 30 Gpm y 75 Psig. El sistema de instrumentación requiere aire de instrumentos entre 150 y 60 Psig.

Además, se tienen instalados dos enfriadores (intercambiadores de calor tipo casco – tubo) conectados en paralelo con el fin disminuir la temperatura del aceite antes de que ingresen a los filtros a 120 °F aproximadamente, éstos utilizan el agua de enfriamiento suministrada externamente como fluido refrigerante, posteriormente en el recorrido del aceite se tienen dos filtros de 10 µm conectados en paralelo para garantizar las condiciones de limpieza según los requerimiento de la norma ISO 4406.

Los equipos principales del Subsistema de Lubricación son listados en la Tabla 9.

Tabla 9. Listado de equipos del Subsistema de Lubricación de los Compresores centrífugos.

#	DESCRIPCIÓN EQUIPO
1	BOMBA PRINCIPAL DE LUBRICACIÓN
2	BOMBA DE LUBRICACIÓN AUXILIAR
3	MOTOR DE BOMBA DE LUBRICACIÓN AUXILIAR
4	ENFRIADOR DE ACEITE
5	FILTRO DE ACEITE
6	TANQUE RESERVORIO DE ACEITE DE LUBRICACIÓN
7	VÁLVULA DE ALIVIO

6.2.4 Subsistema de Monitoreo y Control. El sistema de monitoreo y control del compresor contiene los siguientes componentes principales:

- Panel del Control Local - Local Control Panel (LCP).
- Sistema de Control de Procesos - Process Control System (PCS).
- Centro de Control de motores - Motor Control Center (MCC).
- Sistema Instrumentado de Seguridad - Safety Instrumented System (SIS).

El componente más relevante del sistema de control es el LCP que está constituido principalmente por:

- Panel Táctil de Control – HMI (Human Machine Interface)
- Controlador Lógico Programable - PLC (Programmable Logic Controller)
- Bently Nevada, para monitoreo y protección por vibraciones, temperatura y Desfase, el sistema Bently Nevada es capaz de transmitir al PLC la adquisición de datos y señales de alarma a través de “Modbus” y través de conexión a Internet, y señales de disparo a través de cableado.

Tabla 10. Listado de tipos de equipos del sistema de Monitoreo y Control de los compresores centrífugos.

#	DESCRIPCIÓN EQUIPO	TIPO DE INSTRUMENTO
1	TRANSMISOR DE VIBRACIÓN	VT
2	VÁLVULA GUÍA A LA SUCCIÓN DEL COMPRESOR	IV
3	TRANSMISOR DE TEMPERATURA DE AIRE	AT
4	TERMoeLEMENTO	TE
5	VÁLVULA DE BLOQUEO	XV
7	TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL	PDT
9	TRANSMISOR DE NIVEL	LT
10	TRANSMISOR DE PRESIÓN	PT
11	TRANSMISOR DE TEMPERATURA	TT
12	TRANSMISOR DE FLUJO	FT
13	VÁLVULA CONTROLADORA DE PRESIÓN	PDCV
14	VÁLVULA CONTROLADORA DE FLUJO	PV
15	VÁLVULA CONTROLADORA DE TEMPERATURA	TV
16	BENTLY NEVADA SERIE 3500	Bently Nevada
17	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE – PLC	PLC
18	SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD	SIS
19	PANEL TÁCTIL DE CONTROL (HUMAN MACHINE INTERFACE)	HMI
20	SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS (PROCESS CONTROL SYSTEM)	PCS
21	SWITCH DE NIVEL	LSL

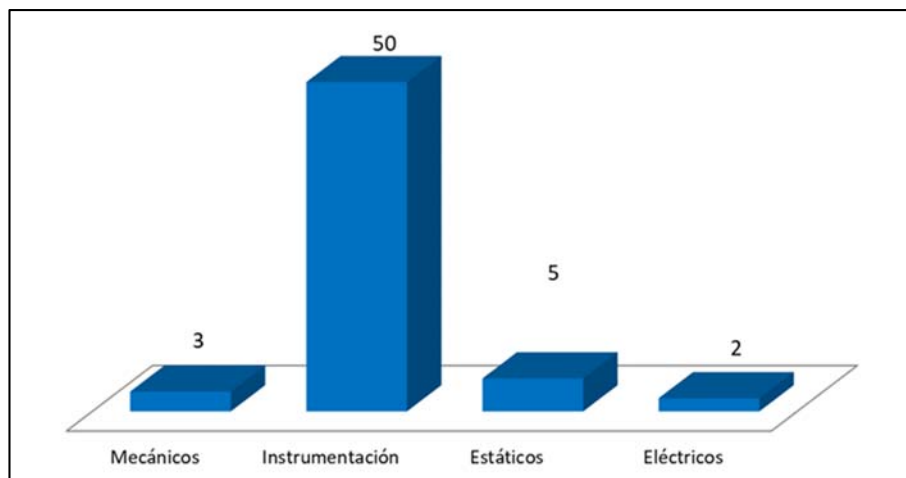
6.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Como resultado del RCM se obtiene el Plan de Mantenimiento y las tareas de cuidado básico de los compresores centrífugos de aire. A continuación, se detallan los diferentes resultados obtenidos con la aplicación de la estrategia sobre el Sistema de Compresión de aire de los compresores centrífugos del departamento

de servicios industriales refinería. Durante el análisis se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por el fabricante (Anexo D).

6.3.1 Población de equipos analizados. Haciendo una clasificación por especialidad del número de equipos que hicieron parte del análisis durante la ejecución del taller de RCM para el sistema de Compresión de aire de los compresores centrífugos del departamento de servicios industriales refinería, se tiene:

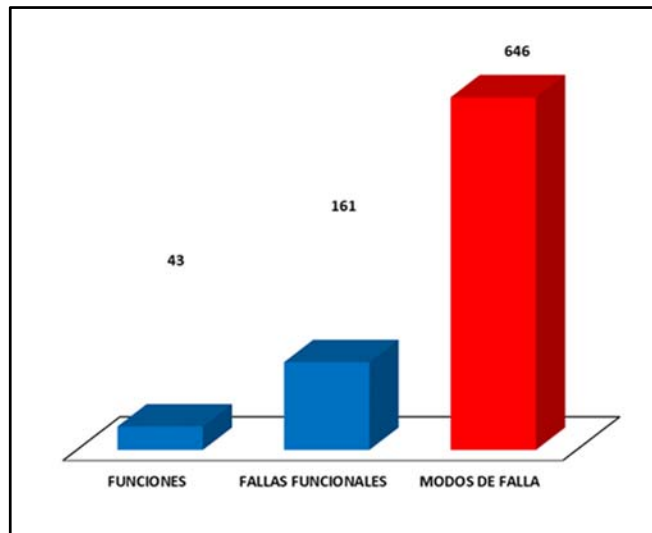
Figura 17. Población Total de equipos analizados por cada compresor.



En general, se analizaron 60 equipos, 50 de los cuales están asociados a la especialidad de instrumentación que se traduce en un 83.3% del total, seguido de los equipos estáticos con un total de 5 equipos que corresponden al 8.33% del total, en la figura 17 se muestra la distribución.

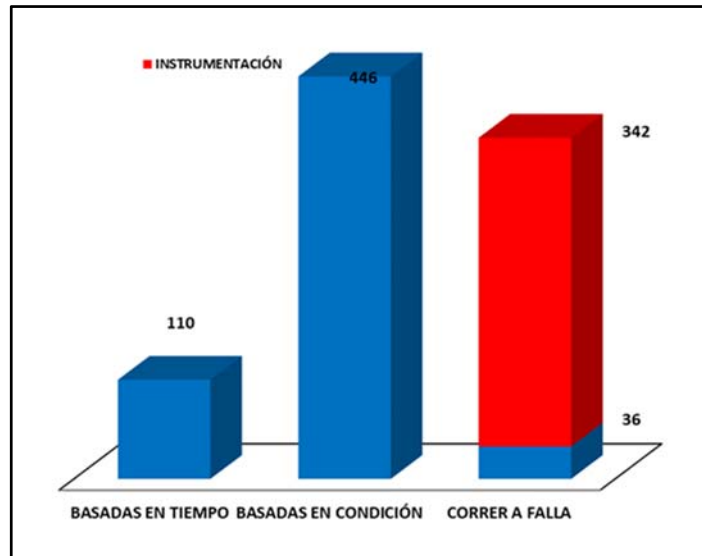
6.3.2 Modos de Falla. Del Análisis de modos y Efectos de falla (FMEA) que se detalla en el Anexo A, se identificaron 43 Funciones, a las cuales se asociaron 161 Fallas Funcionales y un total de 638 Modos de Falla definidos para los sistemas y componentes analizados, estos fueron estandarizados (solo en los casos donde aplicó) con el fin de manejar un lineamiento único y no hacer en repeticiones de modos de falla iguales, la relación de Funciones, Fallas Funcionales y Modos de falla se puede apreciar en la Figura 18.

Figura 18. Relación de Funciones, Fallas Funcionales y Modos de Falla obtenidos del RCM al Sistema de aire de los compresores centrífugos.



6.3.3 Plan de Mantenimiento. El Plan de Mantenimiento obtenido a partir del RCM al sistema de aire de los compresores centrífugos del departamento servicios industriales refinería, concluye que se tienen 552 tareas preventivas y 378 tareas de correr a falla. En la Figura 19 se muestra su distribución.

Figura 19. Número de tareas por clase de mantenimiento del Sistema de aire.



Las tareas obtenidas son el resultado de agrupar tareas únicas y que aplican a diferentes modos de falla.

Las tareas de monitoreo de condición superan en un 50.3% a las tareas basadas en tiempo (110 TBT Vs 446 CMT), se puede decir que el Plan de Mantenimiento cuenta con un gran índice de monitoreo de la condición, esto lo facilitó en gran medida la alta tecnología con la que cuenta el Sistema de compresión de aire de los compresores centrífugos del departamento de servicios industriales refinería, sumado a las tareas de Monitoreo de condición (CMT) que se propusieron a realizar durante la ejecución de mantenimientos Mayores, así mismo se puede apreciar que existen muchos modos de falla que en el análisis fueron manejados con la estrategia de Correr a Falla RTF (Run to Failure), y también hacen parte del plan de mantenimiento correctivo.

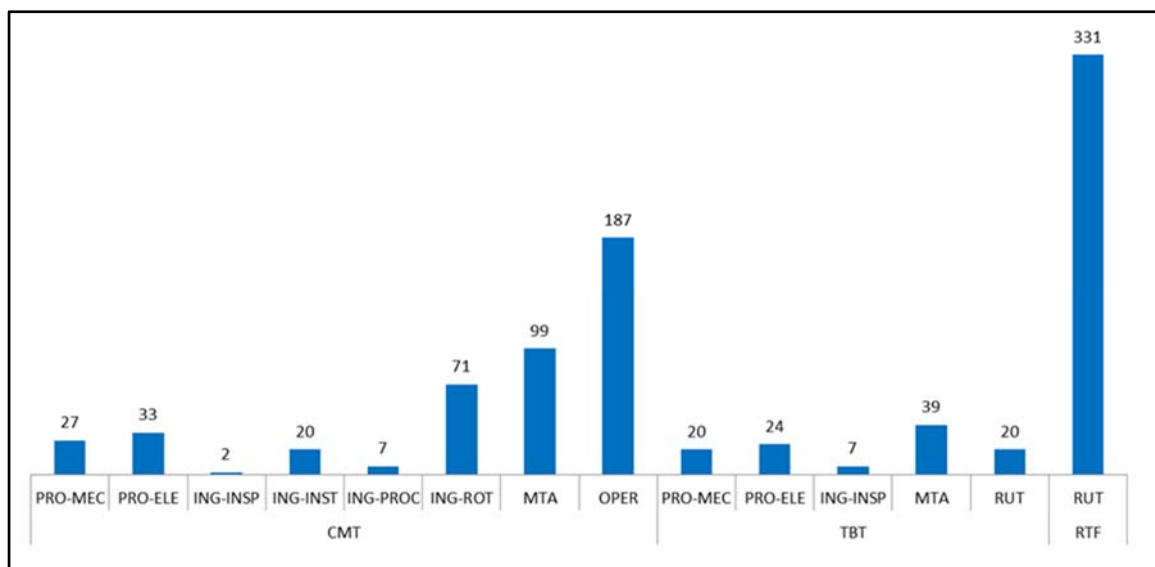
De los resultados puede observarse que el 37.3% de las tareas de correr a la falla corresponden a equipos de instrumentación, cuya naturaleza de falla es aleatoria y

por ello en aquellos casos en que la pérdida de la función es crítica se considera desde el diseño instalarlos con redundancia de acuerdo a las capas de seguridad requeridas.

Para los equipos de instrumentación se propuso pruebas funcionales que se realizan con una frecuencia determinada durante el ciclo de corrida de la planta, al igual que tareas de verificación de ajustes y comparación con patrones certificados durante los mantenimientos mayores de las bombas, de manera tal de capturar cualquier desviación que pudiesen presentar durante operación, estos mantenimientos pueden observarse en las en las tareas basadas en condición.

6.3.4 Tareas de mantenimiento por tipo y grupo ejecutor. La cantidad de tareas clasificadas por tipo de mantenimiento y grupo ejecutor se muestra en la figura 20.

Figura 20. Numero de tareas por Tipo de Mantenimiento.



Se puede observar que para este sistema el frente ejecutor Operador tiene una gran incidencia en el resultado de la estrategia con el 41.9 % de las tareas de Mantenimiento proactivo, durante las secciones de RCM se resalta la labor del Operador como “Primer Mantenedor” y se lleva la mayoría de modos de falla a una primera detección en las labores diarias y que hacen parte la esencia de Operar, de ésta manera se asegura en primera instancia que los modos de fallas sean cubiertos con estrategias de Monitoreo de Condición y en segunda instancia se regulan estrategias de Mantenimiento Basado en Condición a aquellos modos de falla que en la práctica no era posible su monitoreo, todo lo anterior incluido en las rondas de operacionales sobre el proceso.

En la actualidad se tiene un rol denominado Técnico de Consola TC (Tablerista), y su función es asegurar que todas las variables operacionales estén dentro de los parámetros normales, las tareas que para los casos en los que apliquen serían las mismas que las que realiza el operador (Monitoreo de las variables Técnicas y Operacionales) y no fueron tenidas en cuenta para no hacer el Contenido del RCM más extenso.

La naturaleza dinámica del sistema lleva a que muchas de las tareas basadas en condición (CMT) se realicen por la especialidad mecánica, rotativa y sean complementadas por el análisis continuo del proceso por los operadores. Para modos de falla que pudiesen tener falla oculta o con una velocidad de deterioro que no permita detectar inicios de Fallas Funcionales a tiempo se proponen un numero de tareas proactivas para determinar el estado funcional del equipo, se definieron como “Pruebas Funcionales” y en los resultados obtenidos del RCM realizado al sistema de aire de los compresores centrífugos del departamento de servicios industriales refinería, se tiene que el 12.2 % de las tareas de Mantenimiento Proactivo corresponde a ellas.

7. CONCLUSIONES

Con la metodología RCM se permitió conocer a profundidad la máquina en estudio, se analizaron todas sus funciones y se tuvieron en cuenta todas las fallas que no tenía una tarea preventiva y que podían volver a ocurrir.

No se requiere contar con un Bullgear en stock, pero si se recomienda tener en stock juego de rotores de alta y baja balanceados y almacenados según las especificaciones del fabricante. De encontrarse algún problema con alguno de los rotores, es recomendable realizar el cambio completo puesto que viene balanceado de fábrica y enviar el rotor con problemas al fabricante para su revisión y reparación de ser posible.

El alojamiento de los enfriadores inter - etapas debe ser limpiado e inspeccionado y protegido con pintura epóxica durante las paradas mayores para evitar los ataques por corrosión y los arrastres de partículas sólidas hacia alguno de los rotores.

El sistema de lubricación podría afectar la vida útil de los sellos secos, se recomienda verificar por parte del operador que la presión de aceite no sea superior a la requerida por el compresor.

Revisión e inspección interna de la válvula check a la descarga durante cada mantenimiento mayor es importante para evitar los taponamientos a la descarga del compresor o contraflujos que afecten la integridad de los cojinetes. El representante del fabricante enviara procedimiento.

Se deben realizar las pruebas funcionales de todos los sistemas de alarma y disparo durante las paradas mayores, al igual que el accionamiento de las válvulas de admisión, antisurge y check a fin de garantizar el buen funcionamiento y la calibración de los instrumentos asociados.

El fabricante indica que el sistema de sellado podría trabajar por aproximadamente 15 minutos sin el suministro de aire de sellos externo, sin embargo, operar en este régimen podría acortar la vida útil de los componentes y por ello recomienda siempre mantener la presión y calidad de aire en la línea de sellado sea que el equipo esté en funcionamiento o parado.

Los sellos deben ser manipulados por personal calificado o supervisados por un representante del fabricante durante el desmontaje, inspección o en la instalación.

Se eliminó del análisis algunas recomendaciones dirigidas a reapriete de pernos, esto dado que se considera suficiente el análisis de vibraciones para detectar dicha anomalía

BIBLIOGRAFÍA

ECOPETROL S.A. Instructivo para realización de talleres de análisis de RCM en Ecopetrol S.A. ECP-GCM-G-004. Bogotá D.C.: La Compañía. 14 p.

_____. Manual de calidad de Ecopetrol S.A. Bogotá D.C.: La Compañía, 2013. 85 p.

_____. Manual de procesos de Ecopetrol S.A. Bogotá D.C.: La Compañía, 2015. 135 p.

_____. Organigrama. [En línea]. [Consultado el: 13 de febrero de 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/estructura-organizacional/organigrama>

_____. Proyecto Plan Maestro de Servicios Industriales de la Refinería de Barrancabermeja (EPC3-AIRE). Barrancabermeja: La Compañía, 2015.

GAMBOA, Ingrid. Mantenimiento de plantas. [En línea]. [Consultado el: 10 de junio de 2019]. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/15549389>

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Memorias de clase de Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2006.

INGERSOLL RAND INC. Manual de Operación Compresor Centrifugo Ingersoll Rand Centac. Dublin, Irlanda: La Compañía, 2012. 241 p.

INTERNACIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224. 2 ed. Ginebra: ISO, 2006. 178 p.

María del Pilar. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2018.

MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas de industriales y de servicios. Ciudad de México.: Alfaomega Grupo Editorial, 2005. 306 p. ISBN: 958-338-218-3.

MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 446 p. ISBN 09539603-2-3.

VALDERRAMA, María del Pilar. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2018.

VEGA VINDAS, Karla Vanessa. Diseño de una propuesta de gestión de mantenimiento basada en un cuadro de mando integral, para el departamento de facilidades para una planta de manufactura de productos médico. [En línea]. Trabajo de grado Licenciatura en Ingeniería de Mantenimiento Industrial. Cartago, Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Electromecánica. Ingeniería en Mantenimiento Industrial, 2014. 187 p. [Consultado el: 10 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3347>