

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
EXTENSIÓN REGIÓN CENTRO-SUR ANACO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LOS PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO PARA LOS MOTORES
WAUKESHA L 7042 GSI DE LA PLANTA COMPRESORA SANTA ROSA II
2000 ANACO ESTADO ANZOÁTEGUI”**

**Realizado por:
Sánchez R., Robert J.**

**Trabajo de Grado Presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito
para Optar al Título de:**

INGENIERO INDUSTRIAL

Anaco, Septiembre del 2015

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
EXTENSIÓN REGIÓN CENTRO-SUR ANACO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LOS PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO PARA LOS MOTORES
WAUKESHA L 7042 GSI DE LA PLANTA COMPRESORA SANTA ROSA II
2000 ANACO ESTADO ANZOÁTEGUI”**

Revisado por:

Ing. Ledezma, Melchor
Asesor Académico

Ing. Gómez, Marcos
Asesor Industrial

Anaco, Septiembre del 2015

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
EXTENSIÓN REGIÓN CENTRO-SUR ANACO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LOS PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO PARA LOS MOTORES
WAUKESHA L 7042 GSI DE LA PLANTA COMPRESORA SANTA ROSA II
2000 ANACO ESTADO ANZOÁTEGUI”**

Jurado Calificador:

EL Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

**Ing. Ledezma, Melchor
Asesor Académico**

**Ing. García, Jaime
Jurado Principal**

**Esp. Alcántara, José
Jurado Principal**

Anaco, Septiembre del 2015

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización”

DEDICATORIA

Le dedico este momento tan esperando a mi Dios, que me ha dado la sabiduría necesaria en mi vida para tomar las decisiones, en los momentos más difíciles nunca perdí la esperanza ya que fue mi guía en todo momento.

A mi MAMA Lesbia María Sánchez y mi PAPA Robert Sánchez quienes me han brindado todo su amor y apoyo incondicional en los momentos mas difíciles de mi vida, por educarme y enseñarme valores los cuales me han sido de mucha en mi vida.

A mis hermanas María Sánchez y Rossi Sánchez, gracias por preocuparse por mi y brindarme su apoyo en todo momento.

A mi hija Valeria Sofía, gracias mi conejita ya que en los momentos donde estuve a punto de dejarlo todo pensaba en ti y me devolvías la esperanza, contigo aprendí a ser responsable , perseverante y conocer el bello sentimiento de ser padre.

A mi novia Ceelynes Rondón, quien agradecido con Dios de ponerla en mi vida cuando más la necesitaba, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por ser muchas veces esa luz que alumbro mis oscuros días con una sonrisa, gracias por ser parte fundamental en mi vida.

Este trabajo tiene un poco de cada uno de ustedes, los amo un mundo, no los cambiaría por nada y agradecido eternamente con Dios por mandarme personas tan especiales como ustedes, los amo!!!

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por siempre estar a mi lado de alguna u otra forma moldear mi carácter y enseñarme a perseverar en la vida a pesar de las duras pruebas, mis padres quienes a través de sus sacrificios nos sacaron adelante, por brindarme su amor y ser mi ejemplo a seguir, mis hermanas por influir en mi vida y enseñarme lo que es el respeto y lealtad, a mi hija por ser el motor que impulso mi vida en los momentos difíciles, a mi novia por estar siempre a mi lado, brindarme su amor y su apoyo sin esperar nada a cambio.

A mi abuela Marcelina con quien conviví gran parte de mi niñez y adolescencia, siendo mi segunda madre, a mis tíos: Normando, Alexis, Eudis, Ingrid, Manolo y Chua quienes siempre me ayudaron de una u otra forma a lo largo de mi camino, a mis primos, a mis compañeros de la universidad los cuales llegamos a compartir muchos momentos alegres a pesar de todo, llegando a ser mas como familia, personas especiales que nunca olvidaré como, Lilian, Sixto, Yoselin, Anderson, Luismar, Julio, Rosio, Ylfred, Angélica y muchos otros que en este momento no se me viene a la mente pero igual les recuerdo con grato aprecio.

A mi asesor académico, el Profesor Melchor Ledezma, por haber aceptado que fuera su tesista, por el apoyo docente, ético y moral que siempre me ha brindado, y que en este trabajo está reflejado.

A mi asesor industrial: Ingeniero Marcos Gómez, porque usted fue mi guía y ejemplo de comportamiento dentro de la industria petrolera, por su apoyo incondicional y desinteresado cada vez que lo necesitaba.

A las personas que laboran en la Planta Santa Rosa II-2000, gracias a todos por compartir su experiencia laboral y ayudarme en todo momento con mis dudas e inquietudes de mi trabajo de grado y a la Gerencia de Mantenimiento, especialmente a los ingenieros y técnicos de equipos dinámicos y de confiabilidad, por el constante apoyo científico y moral, además de brindarme los conocimientos en cada área de trabajo.

A la Universidad de Oriente, mi casa de estudio, a todo su personal Docente, Administrativo y Obrero, muchas gracias por haberme recibido y permitido el honor de adquirir a través de ustedes las herramientas para ser un Profesional y un mejor contribuyeron en la madurez de mi carácter, por haberme permitido trabajar con usted y dedicarme de su valioso tiempo. Dios les bendiga.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
EXTENSIÓN REGIÓN CENTRO-SUR ANACO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LOS PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO PARA LOS MOTORES
WAUKESHA L 7042 GSI DE LA PLANTA COMPRESORA SANTA ROSA II
2000 ANACO ESTADO ANZOÁTEGUI”**

Autor: Sánchez R., Robert J.
Asesor: Ing. Ledezma, Melchor
Fecha: Septiembre - 2015

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en diferentes parámetros asociados a los motores Waukesha L 7042 GSI de la planta compresora Santa Rosa II 2000 Anaco estado Anzoátegui. Para el cumplimiento de tal objetivo, se realizó un levantamiento de los procesos productivos de la planta, recopilación de información técnica de los equipos incluidos en el estudio, para establecer los niveles de severidad, la frecuencia de monitoreo de cada equipo y luego recomendar acciones que pudiera llevarse al resto de las empresas PDVSA GAS Anaco en sus distintas áreas donde tengan equipos similares, esto con el fin de fortalecer las acciones que actualmente lleva la empresa para mantener los equipos operativos.

Palabras Clave: Mantenimiento, motores Waukesha, planta compresora Santa Rosa II, procesos productivos, PDVSA.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE TBLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	20
EL PROBLEMA	20
1.1 Planteamiento del problema	20
1.2 Generalidades de la empresa PDVSA Gas Anaco	22
1.2.1 Reseña histórica	22
1.2.2 Ubicación geográfica	24
1.2.2.1 Área mayor de Anaco (A.M.A.)	25
1.2.3 Misión	26
1.2.4 Visión	26
1.2.5 Políticas de calidad	26
1.2.6 Estructura organizacional	27
1.2.7 Objetivos de la calidad de la empresa	31
1.3 Generalidades de la planta compresora Santa Rosa II-2000	31
1.3.1 Reseña histórica	31
1.3.2 Ubicación de la planta compresora Santa Rosa II-2000	32
1.3.3 Objetivo de la planta compresora Santa Rosa II-2000	33
1.3.4 Proceso productivo de la planta Santa Rosa II-2000	33
1.4 Objetivos de la investigación	37
1.4.1 Objetivo general	37
1.4.2 Objetivos específicos	37
CAPÍTULO II	38
MARCO TEÓRICO	38
2.1 Antecedentes	38
2.2 Fundamentos teóricos	41
2.2.1 Definición de mantenimiento	41
2.2.2 Tipos de mantenimientos	41
2.2.3 Mantenimiento preventivo	42
2.2.4 Mantenimiento correctivo	42
2.2.5 Los datos de mantenimiento	42
2.2.6 Registro de mantenimiento	42

2.2.7 Error.....	42
2.2.8 Falla	43
2.2.9 Causas de fallas, causa raíz.....	43
2.2.10 Data de falla.....	43
2.2.11 Impacto de falla	43
2.2.12 Mecanismo de falla.....	43
2.2.13 Modo de falla	43
2.2.14 Aviso de falla	43
2.2.15 Falta / error.....	44
2.2.16 Falla oculta	44
2.2.17 Tiempo de inactividad	44
2.2.18 Falla incipiente	44
2.2.19 Análisis de modos y efectos de fallas (AMEF).....	44
2.2.20 Mantenibilidad.....	45
2.2.21 Horas-hombres de mantenimiento.....	45
2.2.22 Plan de mantenimiento preventivo.....	45
2.2.23 Fallas no críticas.....	45
2.2.24 Estado de funcionamiento.....	45
2.2.25 Tiempo de funcionamiento.....	46
2.2.26 Oportunidad de mantenimiento	46
2.2.27 Confiabilidad.....	46
2.2.28 Confiabilidad operacional.....	46
2.2.29 Análisis de criticidad	47
2.2.30 Metodología D.S. de análisis de criticidad	48
2.2.31 Equipo natural de trabajo (ENT).....	52
2.2.32 Funciones ENT.....	53
2.2.32 Falla funcional ENT.....	54
2.2.33 Modos de falla	54
2.2.34 Los efectos de falla	54
2.2.35 Consecuencias de fallas.....	54
2.2.36 Fallas ocultas.....	56
2.2.37 Clasificación de los tiempos en el mantenimiento	56
2.2.38 Distribución de gumbell tipo i.....	57
2.2.39 Distribución de Weibull	57
2.2.40 Parámetros de mantenimiento	58
CAPÍTULO III.....	62
MARCO METODOLÓGICO	62
3.1 Nivel de investigación.....	62
3.2 Diseño de investigación.....	63
3.3 Unidades de estudio	64
3.3.1 Población	64
3.3.2 Muestra	65
3.3.2.1 Muestra humana.....	65

3.3.2.2 Muestra de equipos	65
3.4 Técnicas de recolección de datos	66
3.4.1 Recolección de datos primarios.....	66
3.4.2 Investigación documental.....	68
3.5 Instrumentos de recolección de datos.....	68
3.6 Técnicas de análisis de datos	69
3.6.1 Diagrama de flujo.....	69
3.6.2 Mapa de procesos.....	69
3.6.3 Diagrama de torta.....	70
3.6.4 Análisis de criticidad.....	70
3.6.5 Metodología DS (Diógenes Suarez).....	70
3.6.6 Análisis de modo y efecto de falla	71
3.6.7 Análisis causa-raíz (ACR).....	71
3.6.8 Matriz esfuerzo- impacto	72
3.7 Desarrollo de la investigación	72
3.7.1 Descripción del contexto operacional de los motores Waukesha I7042 GSI.....	72
3.7.2 Identificación de fallas potenciales en los motores Waukesha I7042 GSI mediante un análisis de modo y efecto de falla (AMEF).....	73
3.7.3 Matriz impacto-esfuerzo	74
3.7.4 Matriz de análisis de criticidad para los motores Waukesha utilizando el método de PDVSA.	79
3.7.4.1 Clasificación de los equipos según su criticidad	80
3.7.4.2 Cálculos para el análisis de criticidad de los motores.....	81
3.7.4.3 Cálculo de criticidad para los equipos que integran el subsistema motor con la metodología D.S.	88
3.7.4.4 Clasificación para equipos según la criticidad por Metodología D.S.	90
3.7.4.5 Análisis de modos y efectos de fallas del equipo crítico (AMEF).....	93
3.7.5 Origen de las causas o acontecimientos de los problemas los motores Waukesha L7042 a través de un análisis causa-raíz (ACR)	94
3.7.6 Determinación de los parámetros de mantenimientos para los equipos críticos de la unidad motocompresora.....	95
3.7.7 Cálculos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad	95
3.7.8 Calculo de la frecuencia de las actividades de mantenimiento a los equipos críticos de la unidad motocompresora K-4.	104
3.7.9 Plan de mantenimiento preventivo para los motores Waukesha L 7042 GSI.....	105
CAPÍTULO IV	106
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	106
4.1 Descripción del contexto operacional de los motores Waukesha L 7042 GSI 106	

4.1.1 Información técnica de los motores Waukesha 7042 GSI según especificaciones del fabricante y datos proporcionados por el ENT del complejo Santa Rosa II 2000.....	106
4.2.2 Descripción del Proceso de las unidades motocompresoras de la planta compresora Santa Rosa II-2000.....	117
4.3 Identificación de fallas potenciales en los motores Waukesha L7042 GSI mediante un análisis de modo y efecto de falla (AMEF)	120
4.3.1 Análisis de los resultados de la matriz impacto-esfuerzo	120
4.3.2 Análisis de los resultados de la matriz de criticidad aplicado a los motores Waukesha utilizando el método de PDVSA	123
4.3.3 Análisis de Criticidad para los equipos que integran el subsistema motor. Metodología D.S.....	126
4.3.4 Resultados del análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del subsistema del equipo crítico (cámara).....	130
4.4 Origen de las causas o acontecimientos de los problemas en los motores Waukesha L7042 a través de un análisis causa-raíz (ACR).....	135
4.5 Determinación de los parámetros de mantenimiento para los motores Waukesha L7042 GSI.....	144
4.5.1 frecuencia de las actividades de mantenimiento a los equipos críticos de la unidad motocompresora K-4	145
4.6 Plan de mantenimiento predictivo para los motores Waukesha L7042 GSI..	147
4.6.1 Descripción del plan de mantenimiento actual aplicado a la unidades motocompresoras	147
4.6.2 Determinación de actividades de mantenimiento de la cámara que conforma el subsistema motor de la unidad motocompresora K-4.....	149
CAPÍTULO V	163
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	163
5.1. Conclusiones	163
5.2. Recomendaciones	164
BIBLIOGRAFÍA.....	166
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	169

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Parámetros para definir la criticidad de un equipo	51
Tabla 3.1. Equipo natural de trabajo de la unidad motocompresora K-4.	73
Tabla 3.2. Encuesta de impacto para los subsistema.....	75
Tabla 3.3. Calculo del impacto para los subsistema de la unidad motocompresora...	76
Tabla 3.4. Escala de impacto aplicada a los subsistema.....	77
Tabla 3.5. Encuesta esfuerzo aplicado a los subsistema de la unidad motocompresora.	78
Tabla 3.6. Escala de esfuerzo para jerarquizar sistemas.....	79
Tabla 3.7. Parámetros para el cálculo del índice de probabilidad de falla.....	82
Tabla 3.8. Cálculo de integridad mecánica	84
Tabla 3.9 Cálculo de desempeño.....	84
Tabla 3.10 Cálculo de control y protección.....	85
Tabla 3.11 Cálculo para inventario de repuestos	85
Tabla 3.12. Cálculo final del índice promedio de fallas.....	86
Tabla 3.13. Parámetros para el cálculo de la consecuencia	86
Tabla 3.14. Cálculo final de consecuencias.....	87
Tabla 3.15. Cálculo final de la criticidad de los motores Waukesha.	88
Tabla 3.16. Matriz de criticidad de la metodología D.S.....	89
Tabla 3.17. Clasificación para equipos según la criticidad empleando la Metodología D.S.....	90
Tabla 3.18. Cálculo final de la criticidad para los equipos de los motores Waukesha.....	93
Tabla 3.19. Resumen Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas	94
Tabla 3.20. Resultados de los TFS y $\% F_{(i)}$ para la gráfica de Gumbell Tipo I.	96
Tabla 3.21. Resultados de los TEF y $\% F_{(i)}$ para la gráfica de Weibull.....	100
Tabla 3.22. Tabla numérica de la distribución de Weibull para determinar los valores de A correspondiente a cada valor del parámetro de forma β	101
Tabla 4.1 Subsistemas y componentes de la unidad motocompresora.....	107
Tabla 4.2 Especificaciones técnicas del subsistema motor.....	108
Tabla 4.3 Especificaciones técnicas del arranque.....	109
Tabla 4.4 Especificaciones técnicas de la electroválvula	110
Tabla 4.6 Especificaciones técnicas del carburador.....	112
Tabla 4.7 Especificaciones técnicas del gobernador.....	113
Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del generador.....	114
Tabla 4.9 Especificaciones técnicas de la cámara.....	115
Tabla 4.10 Especificaciones técnicas del turbo.....	116

Tabla 4.11. Resultados del impacto.....	120
Tabla 4.12. Resultados del esfuerzo.....	121
Tabla 4.13. Resultados generales de la prioridad.....	122
Tabla 4.14. Resultados de la criticidad de los siete (7) motores Waukesha.....	124
Tabla 4.15. Resultados de los factores en el área de mantenimiento y en el área operacional para todos los equipos del subsistema motor.....	127
Tabla 4.16. Clasificación de los equipos del subsistema motor de acuerdo al nivel de criticidad.....	127
Tabla 4.17. Matriz de criticidad para la cámara.....	129
Tabla 4.18. Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara.....	131
Tabla 4.19 Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara.....	132
Tabla 4.20 Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara.....	133
Tabla 4.21. Resultados del análisis de modos y efectos de fallas aplicado a la cámara.....	134
Tabla 4.22. Fallas Jerarquizadas en función al número de ocurrencia y tiempos de fuera de servicio totales.....	135
Tabla 4.23. Valores de confiabilidad y disponibilidad para la cámara.....	144
Tabla 4.24. Resultado del tiempo de intervención de la cámara.....	146
Tabla 4.25. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.....	153
Tabla 4.26-A. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.....	154
Tabla 4.26-B. Plan de Mantenimiento de las Cámaras de la Unidad Motocompresora K-4.....	155
Tabla 4.27. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.....	156
Tabla 4.28. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.....	157
Tabla 4.29. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.....	158
Tabla 4.30. Cantidad de tareas propuestas por tipo para las cámaras.....	159
Tabla 4.31. Cantidad de tareas propuestas por nivel para las cámaras.....	160
Tabla 4.32. Cantidad de tareas propuestas por ejecutor para las cámaras.....	161
Tabla 4.33. Cantidad de tareas propuestas según la frecuencia de ejecución para las cámaras.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Ubicación geográfica de el distrito Gas Anaco	24
Figura 1.2 Ubicación geográfica de El A.M.A Y el A.M.O.....	25
Figura 1.3 Distribución geográfica del A.M.A.....	26
Figura 1.4. Estructura organizacional gerencia de operaciones AMA.....	28
Figura 1.5. Estructura organizacional gerencia de mantenimiento	29
Figura 1.6. Estructura organizacional gerencia de mantenimiento AMA este, (mantenimiento operacional)	30
Figura 1.7. Ubicación geográfica de la planta Santa Rosa II-2000.....	33
Figura 1.8 Sistema de procesos de la planta Santa Rosa II-2000	36
Figura 2.1: Sistema de confiabilidad operacional.....	47
Figura 2.2 Parámetros utilizados por la metodología de análisis de criticidad D.S... 49	49
Figura 2.3: Matriz para análisis de criticidad.	50
Figura 2.4: Equipo natural de trabajo. (2008).....	52
Figura 2.5: Clasificación de las consecuencias de las fallas	55
Figura 2.6. Curva de la bañera	60
Figura 3.1. Matriz de criticidad	80
Figura 3.2. Leyenda de la matriz de criticidad	81
Figura 3.4. Gráfico de confiabilidad en el papel de Weibull	103
Figura 4.1 Arranque	109
Figura 4.2 Electroválvula.....	110
Tabla 4.5 Especificaciones técnicas de la válvula de gas combustible	111
Figura 4.3 Válvula de gas combustible	111
Figura 4.4 Carburador.....	112
Figura 4.5 Gobernador	113
Figura 4.6Generador.....	114
Figura 4.7 Cámara	115
Figura 4.8 Turbo.....	116
Figura 4.9 Diagrama de procesos de las unidades motocompresoras.....	119
Figura 4.10. Matriz de prioridades	122
Figura 4.11.Distribución porcentual de los subsistemas de la unidad según la prioridad obtenida.	123
Figura 4.12. Matriz de criticidad de los motores Waukesha 7042GSI.....	125
Figura 4.13.Distribución porcentual de los niveles de criticidad de los 7 motores Waukesha 7042gsi.	126
Figura 4.14.Distribución porcentual de los equipos del subsistema motor de acuerdo al nivel de criticidad obtenido.	128
Figura 4.15. Distribución porcentual de los resultados del AMEF aplicado a la cámara.....	134

Figura 4.16. Esquema de la unidad motocompresora K-4 indicando el equipo crítico	136
Figura 4.17 Árbol de fallas del análisis causa-raíz dividido en las hipótesis que podrían causar la Falla de la cámara	137
Figura 4.18 Cámara C/F 6L de la unidad motocompresora K-4.....	139
Figura 4.19 Condiciones físicas encontradas en la cámara.....	139
Figura 4.20. Depósitos minerales presentes en los pasajes de enfriamiento de las válvulas de la cámara.....	140
Figura 4.21 Árbol de fallas del análisis causa-raíz aplicado a la falla crítica de la cámara.....	141
Figura 4.22 Análisis causa-raíz de la falla crítica en la cámara.....	143
Figura 4.23. Flujograma de clasificación de las actividades de mantenimiento según el nivel establecido por PDVSA Gas Anaco.....	151
Figura 4.24. Distribución porcentual de las tareas propuestas por tipo para las cámaras.....	160
Figura 4.25. Distribución porcentual de las tareas propuestas por nivel para las cámaras.....	160
Figura 4.26. Distribución porcentual de las tareas propuestas por ejecutor para las cámaras.....	161
Figura 4.27. Distribución porcentual de las tareas propuestas por frecuencia de ejecución para las cámaras	162

INTRODUCCIÓN

Los sistemas productivos a nivel mundial han alcanzado logros importantes basándose en un conjunto de acciones orientadas a maximizar el funcionamiento de equipos, sistemas, edificaciones, entre otros, con el fin de generar beneficios que en la mayoría de las veces están asociados a la carrera de ingeniería, la cual busca maximizar los elementos productivos. Tal es el caso del conjunto de acciones, agrupadas y perfeccionadas bajo el esquema de la disciplina denominada mantenimiento, la cual se subdivide en diversos tipos, dentro de los cuales se encuentran; proactivo, predictivo, preventivo y correctivo.

Las acciones de mantenimiento requieren un nivel de planificación y programación fundamentada en programas de inspecciones, basada en los análisis, con el objetivo de identificar posibles fallas de forma oportuna para sus posteriores reparaciones.

Por otra parte las acciones preventivas buscan detectar y corregir las fallas potenciales del sistema. Este tipo de mantenimiento puede planificarse y programarse según el tiempo, el uso o la condición del equipo; basados en el monitoreo, registros de variables según inspecciones periódicas, tales como: parámetros operacionales del desempeño de la máquina y sus diferentes manifestaciones (vibraciones, ruidos, estado de lubricantes, entre otros). Esto permite obtener patrones o señales que al analizarlas revelan o indican la condición del equipo y de esta manera poder planificar y programar actividades relacionadas con la solución del problema de forma oportuna para la intervención del activo, disminuyendo los riesgos para la seguridad personal, el ambiente, la integridad de los equipos y así garantizar la continuidad del proceso productivo. Todo ello es importante para el desarrollo de los parques industriales que atiende la ingeniería en sus diferentes ramas.

El presente trabajo tiene como objetivo la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en diferentes parámetros asociados a los motores Waukesha L 7042 GSI de la planta compresora Santa Rosa II 2000 Anaco estado Anzoátegui. Para el cumplimiento de tal objetivo, se realizó un levantamiento de los procesos productivos de la planta, recopilación de información técnica de los equipos incluidos en el estudio. Para establecer los niveles de severidad, la frecuencia de monitoreo de cada equipo y luego recomendar acciones que pudiera llevarse al resto de las empresas PDVSA GAS Anaco en sus distintas áreas donde tengan equipos similares, esto con el fin de fortalecer las acciones que actualmente lleva la empresa para mantener los equipos operativos.

Por todo lo antes expuesto, el trabajo de grado está orientado a la elaboración de un plan de mantenimiento el cual proporcionarán detalles referentes al mantenimiento preventivo, además permitirá conocer en tiempo real la condición del equipo al momento del estudio y su funcionamiento óptimo. Esto aporta el fortalecimiento de la cultura de prevención o disminución de las probabilidades de las fallas de forma oportuna, entre otras. Ello se traduce en mejor desempeño del equipo y evita intervenciones innecesarias.

A continuación se presentará un breve resumen del contenido de este trabajo, distribuido a lo largo de cinco (5) Capítulos, estructurados de la siguiente forma:

Capítulo I. El problema: Se presentará una breve reseña histórica de la planta compresora Santa Rosa II 200, su visión y misión, ubicación geográfica, políticas de calidad, objetivos principales y la estructura organizativa por medio de la cual se busca cumplir con esos objetivos. En este capítulo se realizará el planteamiento del problema, se presenta el objetivo general, los objetivos específicos, sus limitaciones y alcances de los mismos.

Capítulo II. Marco Teórico: Aquí se incluirán los antecedentes de esta investigación, se realizará la exposición breve y concisa de fundamentos teóricos, resaltando los conceptos y principios que se deben tener claros para la aplicación de la metodología de la matriz impacto-esfuerzo, de análisis de criticidad, análisis de modos y efectos de falla y análisis causa raíz para la mejor comprensión del funcionamiento de los motores Waukesha I 7042 GSI de la planta compresora Santa Rosa II 2000.

Capítulo III. Marco Metodológico: En él se señala el tipo de investigación que se realizó, la población, la muestra y se describe brevemente cada una de las etapas del diseño de investigación.

Capítulo IV. Análisis de los Resultados: Muestra detalladamente el desenvolvimiento por cada una de las etapas de la investigación, así como desde el inicio en la búsqueda de los datos, hasta la obtención y análisis de estos.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones: Representó el resumen del estudio realizado en la planta compresora Santa Rosa II 2000 y sus respectivas recomendaciones realizadas por el investigador.

Finalmente se presentan las Referencias Bibliográficas que sirvieron como soporte para el desarrollo del trabajo y los anexos, para ilustrar algunos detalles considerados por el autor.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las grandes corporaciones energéticas mundiales, EXXON MOVIL, CONOCO PHILLIPS y en Venezuela la empresa estatal Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA), responsables de la extracción, manejo y comercialización de los hidrocarburos, en forma líquida como gaseosa.

PDVSA Gas tiene operaciones en las regiones del occidente y el oriente del país. Dicha empresa gasífera dispone de infraestructuras y maquinarias para llevar a cabo sus operaciones de la compresión del Gas. En oriente ella está dividida en diferentes zonas operacionales como son: Maturín, San Tome y finalmente Anaco, esta última cuenta con (03) tres áreas operacionales denominadas: Área Mayor Oficina (AMO), Área Mayor Anaco Oeste y Este (AMAO) y (AMAE).

La planta compresora Santa Rosa II-2000, la cual se ubica dentro del Complejo Santa Rosa, perteneciente al Área Mayor de Anaco Este (AMAE). Dicha planta está diseñada para comprimir un volumen total de Gas Natural de 35 Millones de Pies Cúbicos Estándar Diarios (MMPCED), desde una presión de 60 lpc para ser comprimido hasta 1200 lpc, mediante siete (7) unidades motocompesoras cada una con capacidad instalada de 5 MMPCED de gas natural. Una vez elevada la presión del gas a 1200 lpc es transmitido por gasoductos hacia la planta de extracción Criogénico de San Joaquín ubicada en las cercanías de la ciudad de Anaco.

En la actualidad dichas unidades motocompesoras han presentado fallas recurrentes que influyen negativamente en su desempeño, afectando su rendimiento y

el compromiso de la cuota asignada para la dieta al criogénico de San Joaquín. Entre las principales causas que han sido motivo de alerta y consideración se pueden mencionar: pérdidas de potencia, cámaras agrietadas, pase de compresión al cárter, bajas presiones de agua en la bomba principal, entre otras, que debido a su frecuencia de ocurrencia afectan negativamente las metas de producción planificadas. Por otra parte esto ha generado consecuencias en el mantenimiento por los elevados costos de reparación, además de las pérdidas de producción asociadas a las paradas del equipo.

Debido a que el personal atiende las diferentes áreas simultáneamente no es posible atacar la falla de forma inmediata, esto se traduce en pérdidas por tiempo de espera o fuera de servicio. En otros casos se recarga el personal de mantenimiento o de operaciones en horas extras para restablecer la operatividad de la máquina, quedando el personal expuesto algún accidente laboral, motivado a los largos períodos de trabajo continuo que generan condiciones de riesgo para el sistema de compresión en estudio.

Por lo anteriormente mencionado y debido a la importancia de estos motocompresores en el cumplimiento con las cuotas de compresión de gas asignadas, las Gerencias de Operaciones y Mantenimiento en mutuo acuerdo se plantearon la necesidad de proponer un plan de mantenimiento preventivo, basado en los parámetros de mantenimiento: Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, con el objetivo de reducir las fallas imprevistas que afectan e interrumpen la continuidad de las operaciones. Evitando a su vez los altos costos de mantenimiento, basándose en estrategias que hagan posible disminuir los tiempos fuera de servicio y alargar los tiempos entre fallas, utilizando el monitoreo continuo para llevar a cabo el mantenimiento, basado en la condición de los elementos de la maquinaria antes de generarse la falla.

La realización de esta propuesta contempla técnicas como la matriz impacto-esfuerzo, análisis de criticidad, análisis de modo y efecto de falla, análisis causa raíz y parámetros de mantenimiento, todo esto para establecer criterios que la soporten. En este proyecto de grado se trabajarán con herramientas y equipos especializados con que cuenta en la actualidad los distintos departamentos de mantenimiento de PDVSA GAS quienes están en plena formación y de desarrollo en lo que respecta a dichos equipos, por otra parte la obtención de información sobre ellos no es tarea fácil, sin embargo aseguran los que poseen experiencias con estas nuevas técnicas, que estos nos facilitaran y optimizaran la toma de decisiones en los mantenimientos programados.

1.2 Generalidades de la empresa PDVSA Gas Anaco

1.2.1 Reseña histórica

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), es una empresa propiedad del estado venezolano, creada por decreto presidencial N°1.123 del 30 de agosto de 1.975. Su misión específicamente es la de sustentar y apoyar el desarrollo económico y social del país utilizando al máximo sus recursos. Esto enmarcado en un óptimo desempeño ambiental, mediante una estrategia que abarca desde la atención de las áreas adyacentes a las operaciones hasta el desarrollo de nuevas tecnologías y productos para el mercadeo, cuenta con las mayores reservas de hidrocarburos en el Continente Americano, lo cual la coloca en el 5to lugar mundial en disponibilidad de reservas probadas. Por lo que, conlleva a la responsabilidad de prever la cuota respectiva de los hidrocarburos que requiere el país para su consumo interno.

Satisfaciendo además las necesidades de exploración, los compromisos sociales, comunitarios y conservacionistas. Esto para contribuir a fomentar la eficiencia y profesionalismo de la industria en un marco de responsabilidad

empresarial, asegurando la disponibilidad, desarrollo y óptima utilización de los recursos requeridos y del componente humano que interviene en su cadena de valor.

La empresa, luego de 23 años de actividad, modifica su estructura y emerge con una nueva imagen corporativa a partir del 1 de Enero de 1998, tras la fusión de sus filiales más importantes, Corpoven, Lagoven y Maraven. Dentro de estas transformaciones es creada a mediados del año 1998 PDVSA GAS.

Como parte del proceso de nacionalización previsto en la Ley Orgánica que reserva al estado bienes y servicios conexos a las actividades primarias de hidrocarburos, directivos de PDVSA Exploración y Producción Oriente ocuparon las plantas de manejo de Gas e instalaciones administrativas que eran operadas por la empresa Exterran Venezuela, C.A. en diferentes estados del país.

La ocupación se inició en la sede administrativa ubicada en la entidad, en la avenida Alirio Ugarte Pelayo Maturín, abarcando el proceso de nacionalización hacia todas las plantas de Anaco, San tome, occidente. La nacionalización de las plantas compresoras de gas permitirán el ahorro significativo de recursos para la industria petrolera, en sintonía con las líneas de acción emprendidas por el gobierno bolivariano para devolverle al estado venezolano la plena soberanía petrolera y el control de procesos primarios para las actividades de exploración y producción de hidrocarburos. La defensa de la soberanía nacional en materia de la política petrolera nacional, popular y revolucionaria fue el argumento utilizado por el Gobierno Bolivariano de Venezuela. Esta línea estratégica, se orientó a concretar la nacionalización petrolera del gas, pasando por la reafirmación de la propiedad de los hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo de la nación y el rescate del control de la actividad petrolera, tanto desde el punto de vista del régimen tributario y legal como en el total dominio de la industria petrolera nacional.

1.2.2 Ubicación geográfica

El Distrito Producción Gas Anaco se encuentra ubicado en la parte central del estado Anzoátegui (Figura 1.1), abarcando parte del estado Monagas con un área aproximadamente de 13.400 km². Este fue nombrado “Centro Gasífero de Venezuela” en el año 1999, consolidándose progresivamente como el centro de producción y manejo de gas para el país. Es un distrito importante porque posee yacimientos productores de hidrocarburos; en él existen las mayores reservas de gas del país.

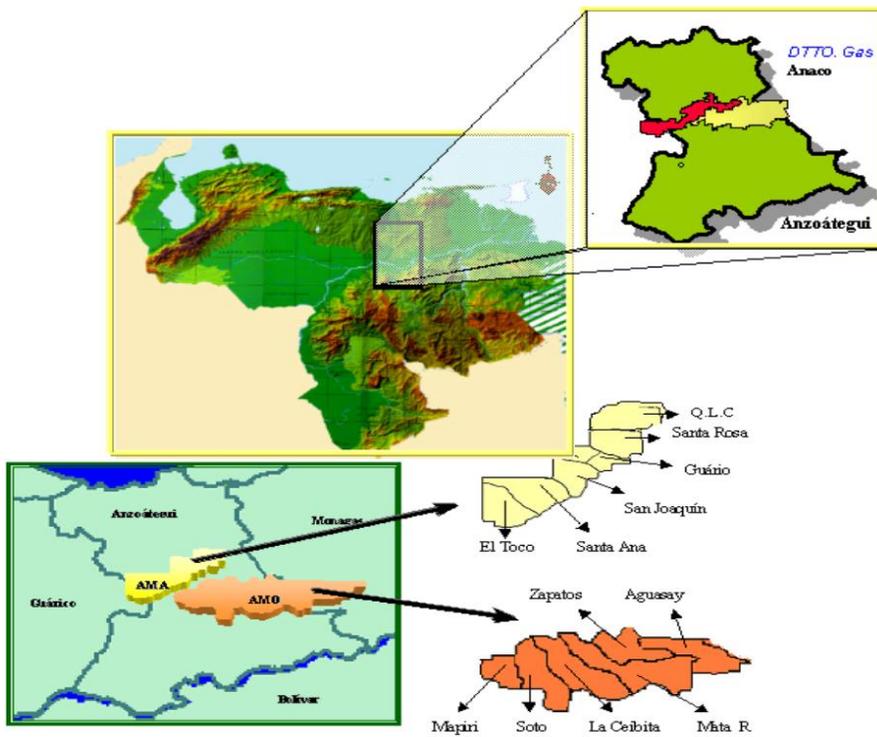


Figura 1.1 Ubicación geográfica de el distrito Gas Anaco
Fuente: PDVSA Gas Anaco

El Distrito Producción Gas Anaco está conformado por dos extensas áreas de explotación que son la unidad de producción Área Mayor Anaco (A.M.A.), y la unidad de producción Área Mayor Oficina (A.M.O.). Mostradas a continuación en la figura 1.2.

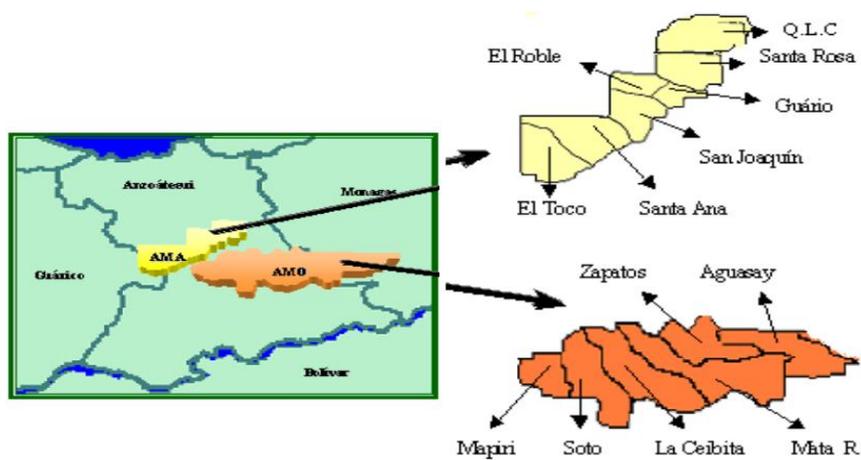


Figura 1.2 Ubicación geográfica de El A.M.A Y el A.M.O.
Fuente: PDVSA Gas Anaco

1.2.2.1 Área mayor de Anaco (A.M.A.)

El Área Mayor de Anaco se encuentra ubicada en la cuenca oriental de Venezuela, subcuenca de Maturín, situada en el bloque levantado al norte del corrimiento de Anaco, cuyo rumbo aproximado es de N 50° E, de sur a norte los campos son: El Toco, sobre un domo del mismo nombre, Santa Ana, en un domo alargado con tres culminaciones menores, El Roble, San Joaquín, con tres elevaciones bien diferenciadas, Guarió, Santa Rosa, un anticlinal fallado.

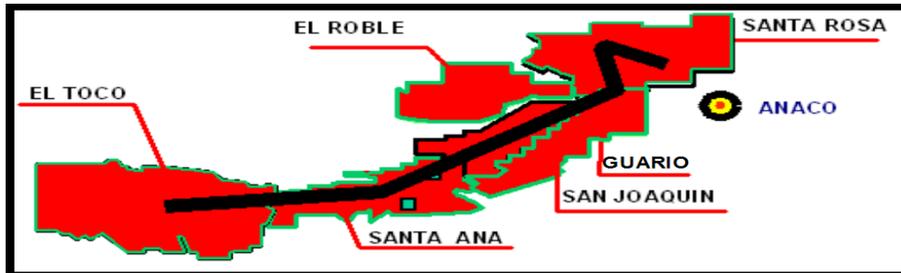


Figura 1.3 Distribución geográfica del A.M.A
Fuente: PDVSA Gas Anaco

1.2.3 Misión

Comprimir y manejar el gas con un recurso humano comprometido con los valores socialistas y capacitados para gestionar los planes de mantenimiento y análisis técnicos para contribuir a mejorar la producción de gas y crudo, en condiciones y ambiente de trabajo seguro.

1.2.4 Visión

Ser la organización de PDVSA GAS que garantice el suministro de gas a nuestra empresa, producción de petróleo y empresas mixtas con altos estándares de calidad que permitan entregar gas al mercado interno para apalancar el plan de desarrollo socialista de la nación.

1.2.5 Políticas de calidad

La gerencia de mantenimiento tiene como propósito satisfacer las necesidades de mantenimiento de las instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos de PDVSA Producción Gas Anaco, brindando eficaz y oportuna respuesta a sus solicitudes, prestando servicios de calidad que garanticen la continuidad operativa de las instalaciones, mediante el cumplimiento de especificaciones, normas aplicables,

verificación de cada proceso en ejecución, capacitación de nuestro recurso humano y mejora continua de los procesos de la organización. Asegurando el uso de proveedores calificados y estando en armonía con el medio ambiente y entorno social.

1.2.6 Estructura organizacional

En la figura 1.4 se muestra la estructura organizacional de la Gerencia de Operaciones de Compresión de Gas del Área Mayor Anaco (AMA) Este, y en las figuras 1.5. y 1.6 las divisiones de Ingeniería de Mantenimiento y Mantenimiento Operacional de la Gerencia de compresión gas.

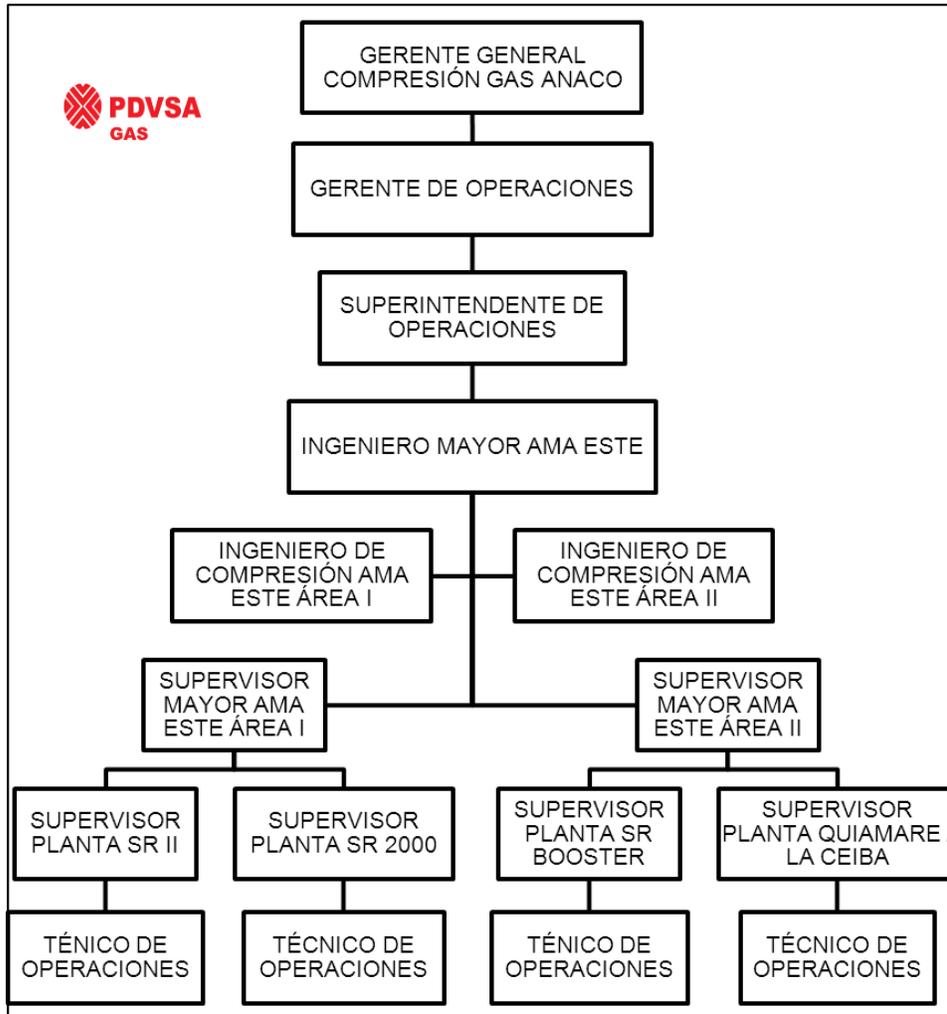


Figura 1.4. Estructura organizacional gerencia de operaciones AMA

Fuente: PDVSA Gas Anaco

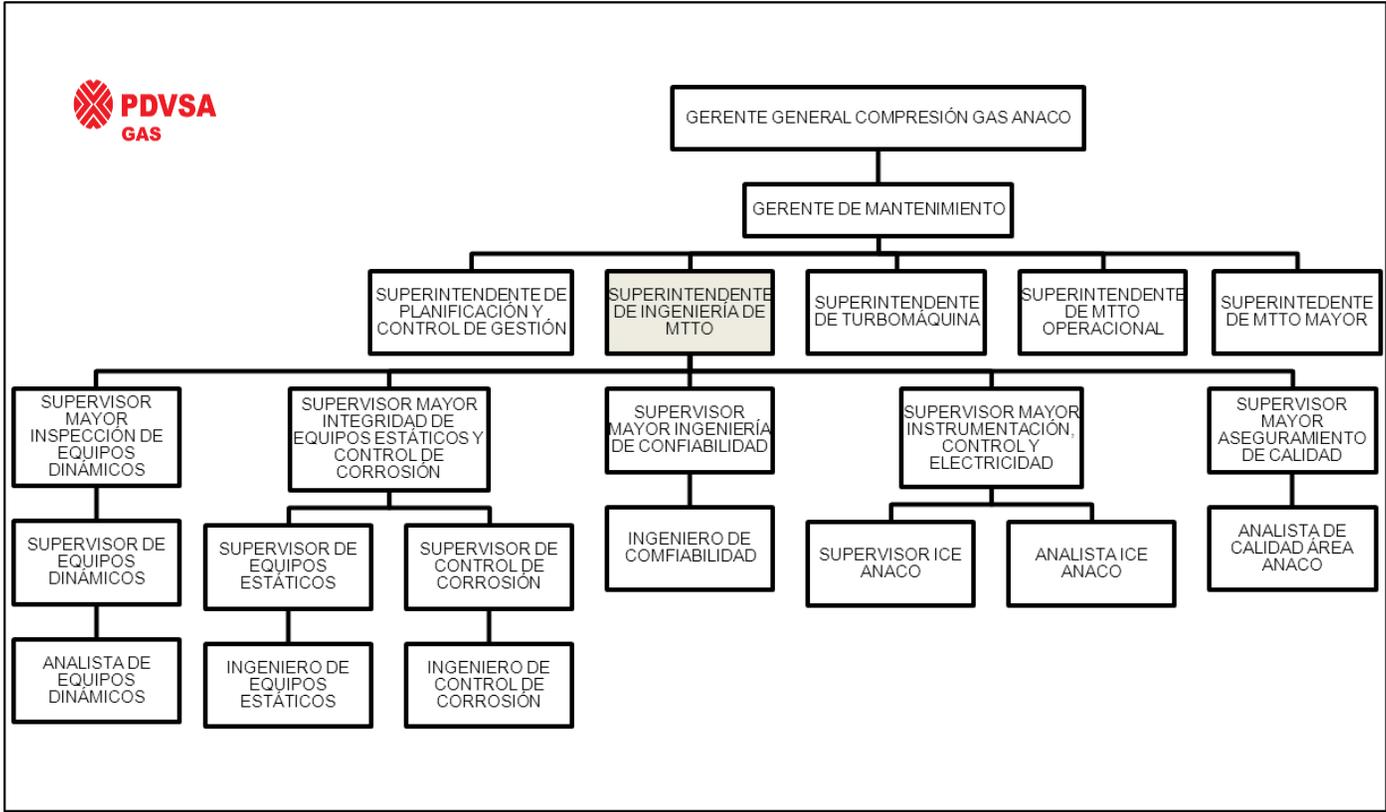


Figura 1.5. Estructura organizacional gerencia de mantenimiento
 Fuente: PDVSA Gas Anaco

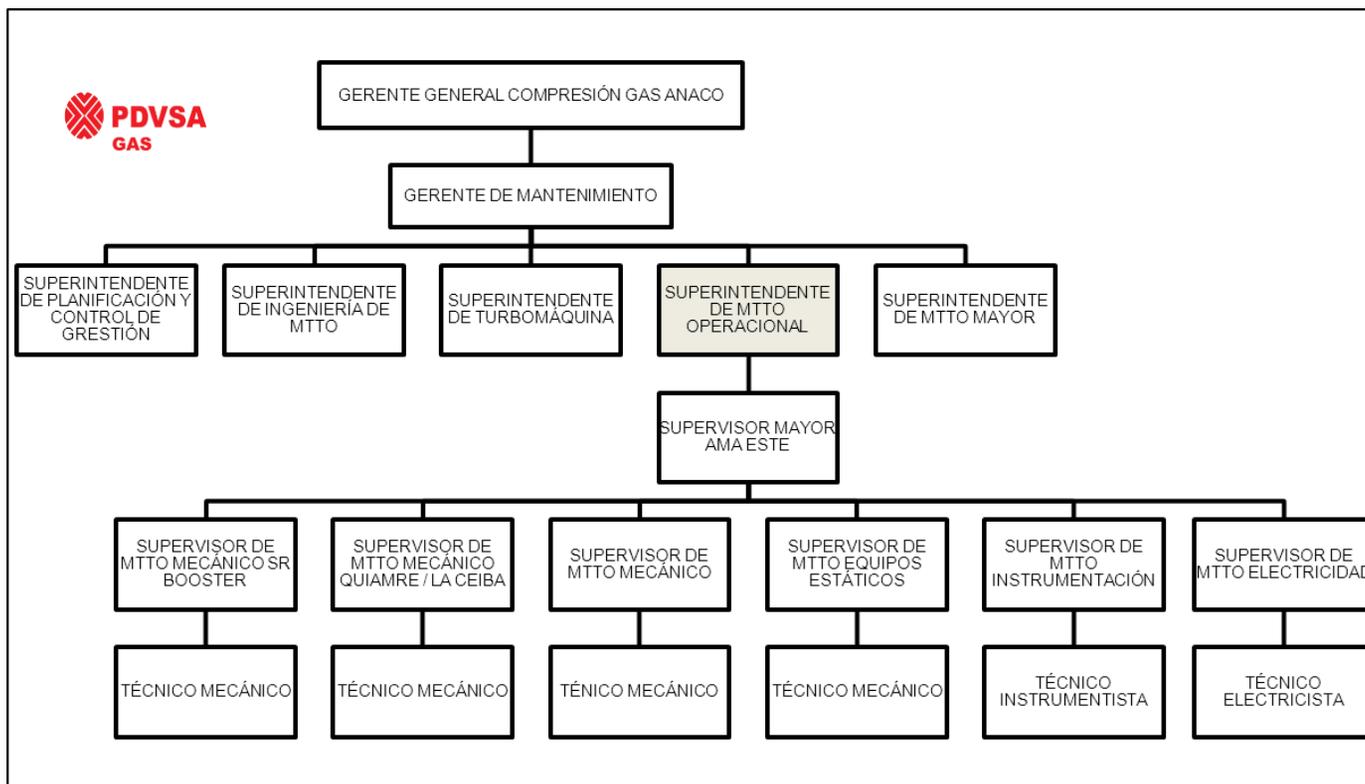


Figura 1.6. Estructura organizacional gerencia de mantenimiento AMA este, (mantenimiento operacional)
Fuente: PDVSA Gas Anaco

1.2.7 Objetivos de la calidad de la empresa

1. Implantar y mantener mediante la mejora continua los sistemas de gestión de calidad en la Gerencia de Mantenimiento.
2. Cumplir con las normas de SIAHO durante la ejecución de las actividades de mantenimiento a través de la concienciación y prevención, a fin de asegurar el bienestar e integridad física del personal y de las instalaciones.
3. Minimizar el impacto ambiental durante la ejecución de las actividades de mantenimiento mediante la concienciación, la capacitación, motivación, planes de prevención, procedimiento, instrumentos de trabajo y cumplimiento con los requisitos legales exigidos.
4. Cumplir en forma eficaz y oportuna con las actividades de mantenimiento sobre la base de acuerdos de servicios que aseguren la satisfacción de los clientes y rentabilidad de la corporación.
5. Cumplir con la capacitación y motivación del personal.
6. Contar con proveedores calificados para la ejecución de las actividades de mantenimiento contratadas externamente, a través de la realización de evaluaciones continuas.
7. Cumplir los compromisos sociales de la corporación, asegurando la inclusión de la oferta social dentro de cada uno de los pliegos de licitación.

1.3 Generalidades de la planta compresora Santa Rosa II-2000

1.3.1 Reseña histórica

En el año 1994 la planta compresora Santa Rosa II, contaba con tres (3) unidades motocompresoras integrales y una turbina, para una capacidad total instalada de 50 MMPCED de gas natural a nivel de 60 lpc, destinado para compresión. Posteriormente, en el año 1998, PDVSA Gas Anaco decide ampliar la

capacidad operacional de la planta compresora Santa Rosa II, debido a la creciente demanda de gas natural a nivel nacional y a la disponibilidad de yacimientos no asociado a nivel de 60 lpc en el área de Santa Rosa, perteneciente al Distrito Gas Anaco.

Siguiendo los lineamientos de PDVSA Gas Anaco, en el año 2000, la gasífera estadounidense EXTERRAN, encargada de la compresión alquilada en Venezuela, instala siete (7) unidades motocompresoras separables capaces de manejar 5 MMPCED cada una de ellas. Con las unidades ya instaladas se crea una nueva planta, bajo el nombre de Santa Rosa II-2000, con una capacidad operacional de 35 MMPCED, logrando aumentar de este modo hasta 85 MMPCED el volumen de gas manejado a nivel de 60 lpc.

El 8 de mayo de 2009, se promulga la Ley Orgánica que reserva al estado, bienes y servicios conexos a las actividades primarias de hidrocarburos, a través de la cual el ejecutivo nacional delegó en PDVSA la nacionalización de los servicios de compresión alquilada de gas en todo el territorio nacional. Como consecuencia de esto, los activos de la gasífera estadounidense EXTERRAN pasaron a ser patrimonio de PDVSA, quedando esta última como único dueño de los mismos y responsable de la compresión del gas natural en Venezuela.

1.3.2 Ubicación de la planta compresora Santa Rosa II-2000

La planta compresora Santa Rosa II-2000 está ubicada en el complejo operacional Santa Rosa, ubicado a 20 km de la ciudad de Anaco del estado Anzoátegui. En la figura 1.7 se muestra la ubicación de la planta compresora Santa Rosa II-2000.

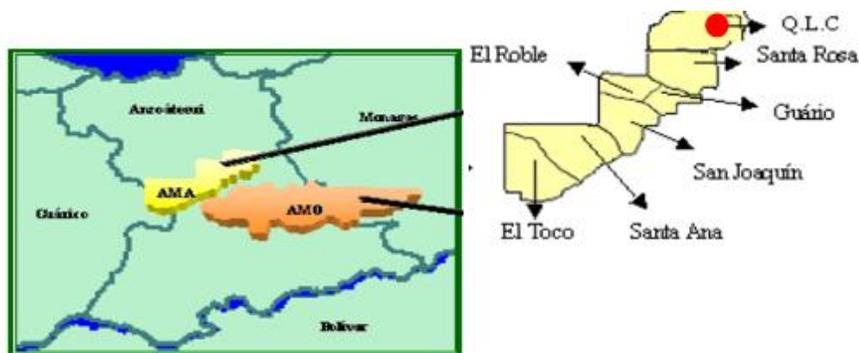


Figura 1.7. Ubicación geográfica de la planta Santa Rosa II-2000
Fuente: PDVSA Gas Anaco

1.3.3 Objetivo de la planta compresora Santa Rosa II-2000.

Su objetivo es comprimir un volumen de 35 Millones de Pies Cúbicos Estándar Diarios, por sus siglas MMPCED de gas natural desde una presión inicial de 60 lpc hasta una presión de descarga de 1200 lpc para facilitar el traslado del gas mediante tendidos de tubería.

1.3.4 Proceso productivo de la planta Santa Rosa II-2000

La planta compresora Santa Rosa II-2000 está conformada por siete (7) unidades motocompresoras, dos (2) separadores de gas combustible, un separador de gas para proceso, tres (3) medidores de flujo constituidos por placas orificio, una cabezal para succión, descarga, venteo y gas combustible, además de un recipiente KOD y una antorcha o flare. Esta planta maneja actualmente una producción de 27 MMPCED de gas natural, asociada a más de 250 pozos activos, ubicados en el área de Santa Rosa, distrito Anaco. Desde estos pozos el gas fluye hasta la estación de Flujo Central ubicada en el complejo operacional Santa Rosa, a través de una red

tuberías, donde el gas es separado, recolectado y transmitido hacia a la planta compresora Santa Rosa II-2000.

El gas entra a la planta compresora Santa Rosa II-2000 por el múltiple de entrada, del cual posteriormente salen dos líneas enterradas: una de 16 pulgadas a nivel de 60 lpc, encargada de transportar el gas destinado para compresión hasta un depurador horizontal, para remover el líquido formado producto de la caída de presión. Luego, el gas pasa por una placa orificio, que registra el flujo volumétrico de succión que maneja la planta, para finalmente llegar al cabezal general de las unidades.

Otra línea de 12 pulgadas pero a nivel de 500 lpc, transporta el gas combustible con el cual se encienden los motores de las unidades. Este gas atraviesa dos (2) procesos de depuración, primero entra a un depurador vertical, a una presión de 350 lpc, donde la mayor cantidad de condensado es separado del gas, después es enviado a otro depurador de configuración horizontal, donde se termina de depurar por completo. El gas finalmente pasa por una segunda placa orificio, que registra el flujo volumétrico de gas combustible que maneja la planta antes de ser enviado al cabezal general.

Una vez que el gas es comprimido por las siete (7) unidades motocompresoras, éste se envía de vuelta hacia el cabezal general, de allí pasa por una tercera placa orificio, que registra el flujo volumétrico de la descarga de la planta y finalmente es enviado hacia el múltiple de salida, mediante una tubería enterrada de 8 pulgadas. Por otra parte la planta compresora emplea un recipiente KOD conectado a un flare o antorcha, para disipar cualquier sobrepresión que se produzca en el sistema, separando primeramente el líquido del gas y luego quemándolo. También cuenta con líneas de venteo hacia la atmósfera, que están enterradas, para el desalajo del gas

atrapado en las unidades cuando se produce un paro. En la figura 1.8 se muestra el diagrama de procesos de la planta Santa Rosa II-2000.

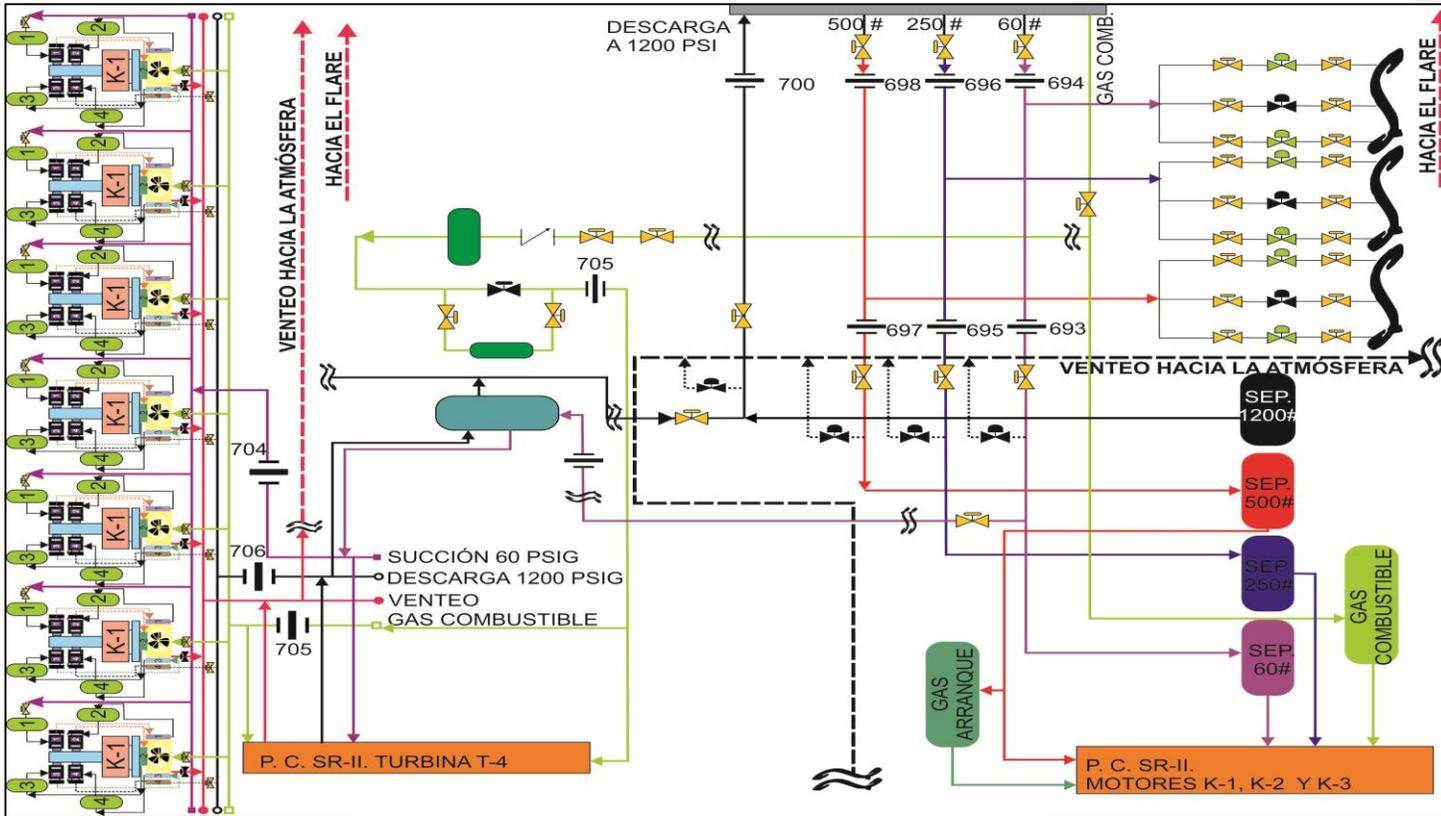


Figura 1.8 Sistema de procesos de la planta Santa Rosa II-2000

Fuente: PDVSA Gas Anaco.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en los parámetros de mantenimiento para los motores Waukesha L 7042 GSI de la planta compresora Santa Rosa II 2000 Anaco estado Anzoátegui.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Describir el contexto operacional de los motores Waukesha L7042 GSI.
2. Identificar fallas potenciales en los motores Waukesha L7042 GSI mediante un Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF).
3. Hallar el origen de las causas o acontecimientos de los problemas de los motores Waukesha L7042 a través de un Análisis Causa-Raíz (ACR).
4. Determinar los parámetros de mantenimiento para los motores Waukesha L7042 GSI.
5. Establecer un plan de mantenimiento preventivo para los motores Waukesha L7042 GSI.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Para la realización de esta investigación fue necesaria la consulta de documentos y tesis que servirán como guía en la elaboración y cumplimiento de los objetivos de este trabajo, entre las cuales podemos citar:

Urbay, G. (2010) en su trabajo de grado “Elaboración De Un Plan De Mantenimiento Centrado En La Confiabilidad Para Equipos Críticos de la Línea de Producción de la Planta Harinera “Chaguaramas” perteneciente a la empresa Cereales y Oleaginosas de Venezuela S.A.” [15], conformó primeramente un Equipo Natural de Trabajo (ENT) según lo sugiere el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC).

Llevó a cabo un estudio detallado de la Situación Operación de la línea de producción de harina de maíz aplicando la Metodología D.S para un análisis de criticidad, jerarquizando los equipos según su Impacto Global, con la finalidad de dirigir los esfuerzos de mantenimientos a los equipos más críticos. Realizó para cada equipo un Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) definiendo actividades de Mantenimiento para trabajar cada modo de falla y luego determinar la frecuencia y aplicar dichas actividades a los equipos. Ya con toda esta información disponible, diseñó el Plan de Mantenimiento para los equipos críticos, con el cual, lograr disminuir la ocurrencia de fallas de estos equipos, y como consecuencia el ahorro de recursos, una alta Confiabilidad y Disponibilidad de la línea de producción, aumentando así no solo la producción sino la calidad del producto.

Este trabajo de grado permitirá recopilar información acerca de la metodología D.S, tomaremos como ejemplo la técnica del AMEF utilizada en dicho proyecto y el cual servirá de referencia para la elaboración del plan de mantenimiento que se realizara a los motores Waukesha L 7042 GSI.

Stronconi, D. Y Tamoy, J. (2010): “Plan de Mantenimiento Correctivo – Preventivo de los Transformadores de Distribución en la Empresa ELEBOL C.A, Ciudad Bolívar – Estado Bolívar.”[14] Esta investigación tiene como objetivo fundamental proponer un Plan de Mantenimiento de los Transformadores de Distribución en la empresa ELEBOL C.A, Ciudad Bolívar – Estado Bolívar. Este trabajo consistió en una investigación de tipo descriptiva, evaluativa, aplicada y de campo. Para desarrollarla se utilizaron técnicas de recolección de datos como la observación directa, entrevistas no estructuradas y el método de mantenimiento de análisis de modo y efecto de falla (AMEF).

Contando como población y muestra los empleados (3) y equipos (9) presente en el taller, como resultado se obtuvo que el trabajo es realizado de forma empírica por parte del personal encargado del mantenimiento y al momento de ejecutarlo no se tiene una secuencia de actividades definidas. Y en la aplicación del AMEF los Números de Prioridad de Riesgo (NPR) obtenidos son (640) bobina o núcleo, (392) el aceite dieléctrico, (280) los bushings de alta y (276) baja, (216) válvula de escape, (96) cubay (45) Conmutador. Partiendo de dichos resultados se determinaron tareas específicas (Pruebas funcionales previas al mantenimiento, desenergización, mantenimiento, energización y puesta en servicio, actividad de cierre.) y estrategias aplicadas a la formación del equipo de trabajo, equipos y materiales utilizados en la ejecución del mantenimiento y medidas de orden y limpieza. Con el fin de que se realice el mantenimiento de forma adecuada.

Mosquera, L. (2008): en su trabajo de grado: “Aplicación de Metodologías de Confiabilidad Integral para Solución de Problemas en el Mejorador de Crudos de PETROPIAR”[6] buscó resolver problemas en el sistema de lubricación de los sellos de bombas y sistemas de protección por sobre velocidad de turbinas a vapor, con la finalidad de buscar la optimización del funcionamiento de los equipos a los cuales están asociados. Para ello recopiló toda la información relevante sobre el funcionamiento y normas que rigen a cada uno de los equipos.

Para el estudio del sistema de lubricación de los sellos de bombas, elaboró un análisis de criticidad, para la cual creó una matriz donde se evaluó la severidad de la instalación del plan API 52, determinando el orden de prioridad en los equipos a los cuales deben ser introducidos modificaciones en la configuración del plan, de este análisis resultó que 29 bombas del total encontradas en el mejorador contaban con una inadecuada instalación, lo cual debe ser corregido. Para el sistema de protección por sobre velocidad de las turbinas a vapor realizó planes de mantenimiento aplicando la Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, con los procedimientos de pruebas de dicho sistema, además de aplicar todos estos procedimientos en campo para verificar el funcionamiento de este sistema en todas las unidades de la planta y ajustarlos en los casos que fueron necesarios.

Mundaraín, C. (2009): “Diseño De Un Programa De Mantenimiento Basado En Condición, Enfocado A La Mejora De La Efectividad De Los Activos Rotativos” [7]. Realizado con la finalidad de diseñar un programa de mantenimiento basado en condición, enfocado en mejorar la efectividad de los activos rotativos críticos de la planta Supermetanol C.A., a fin de disminuir las horas de parada no programadas, elevar la productividad del sistema y minimizar los costos asociados al mantenimiento; primero se realizó un diagnóstico de la situación de los activos y una recopilación de información técnica. Luego se determinaron los equipos críticos, empleando una modificación de la metodología desarrollada por el Ing. J.A. Milá de

la Roca, realizando Análisis de Modos y Efectos de Falla para determinar los modos de falla recurrentes y sus consecuencias.

Esto sirvió de base para las herramientas preventivas que determinaron los procedimientos de inspección y otros aspectos claves como puntos de medición, rutas de muestreo, frecuencia de inspección, actividades. Una vez diseñado todo el programa se procedió a su ejecución, dando como resultado la detección de diversos problemas que de no ser corregidos a tiempo, pueden originar fallas que impactarían significativamente en la producción, seguridad y medio ambiente. Además se observó un incremento del porcentaje de activos en condiciones anormales a lo largo del tiempo de estudio, causado en gran medida, por la no programación y ejecución de las acciones de mantenimiento, recomendadas en los reportes generados, posterior a cada inspección.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Definición de mantenimiento

Conjunto de actividades que permiten mantener un equipo o sistema en condición operativa, de tal forma que cumplan las funciones para las cuales fueron diseñadas y designadas o restablecer dicha condición cuando esta se pierde. [11]

2.2.2 Tipos de mantenimientos

Existen dos tipos básicos de mantenimiento, el preventivo y el correctivo, los cuales por la manera de ejecución, frecuencia, propósito, recursos e instrumentos usados, generan otros subtipos de mantenimientos. [11]

2.2.3 Mantenimiento preventivo

Es una actividad planificada en cuanto a inspección, detección y prevención de fallas, cuyo objetivo es mantener los equipos bajo condiciones específicas de operación. [11]

2.2.4 Mantenimiento correctivo

Son actividades que se realizan después de la ocurrencia de una falla. El objetivo de este tipo de mantenimiento consiste en restablecer las condiciones operativas de un determinado equipo una vez ocurrida la falla, esto por medio de restauración o reemplazo de componentes o partes de equipos, ya sea debido al desgaste, daños o roturas de estos. [11]

2.2.5 Los datos de mantenimiento

Registros que caracterizan la acción de mantenimiento ejecutadas o programados.

2.2.6 Registro de mantenimiento

Parte de la documentación de mantenimiento que contiene todos los fallos, averías y mantenimiento de la información relativa a un artículo.

2.2.7 Error

Discrepancia, observada en la medición de un valor, especificado teóricamente o valor calculado, puede ser causado por un producto defectuoso, o error de cálculo.

2.2.8 Falla

Terminación de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida.

2.2.9 Causas de fallas, causa raíz

Fallas asociadas con el diseño, fabricación, instalación, uso y mantenimiento.

2.2.10 Data de falla

Datos que caracterizan la ocurrencia de un suceso de falla.

2.2.11 Impacto de falla

Impacto de una falla en la función de un equipo (s) o en la planta.

2.2.12 Mecanismo de falla

Físicos, químicos, u otro proceso que conduce a una falla.

2.2.13 Modo de falla

Posibles causas que pueden generar un fallo al mecanismo.

2.2.14 Aviso de falla

Solicitud o requerimiento que se produce de inmediato para reponer el sistema (por ejemplo, el equipo de sustitución de emergencia).

2.2.15 Falta / error

Estado de un elemento se caracteriza por la incapacidad para llevar a cabo la función requerida, excepto la incapacidad de esa índole durante el mantenimiento preventivo u otras acciones previstas, o debido a la falta de recursos externos.

2.2.16 Falla oculta

Cuando no es evidente su detección por parte del personal de mantenimiento.

2.2.17 Tiempo de inactividad

Parte del tiempo hasta que un equipo no está en funcionamiento nuevamente.

2.2.18 Falla incipiente

Imperfección en el estado o condición de un elemento para que un degradado o crítica fracaso podría (o no) con el tiempo ser el resultado esperado si las medidas correctoras no se toman.

2.2.19 Análisis de modos y efectos de fallas (AMEF)

Proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales del diseño de un producto o de un proceso antes de que éstas ocurran, con el propósito de eliminarlas o de minimizar el riesgo asociado a las mismas.

2.2.20 Mantenibilidad

Es la probabilidad de que un activo sea recuperado a una condición específica, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos establecidos. [10]

2.2.21 Horas-hombres de mantenimiento

Duración acumulada de los tiempos de mantenimiento concretos utilizados por todo el personal de mantenimiento para una determinada acción en un intervalo de tiempo definido.

2.2.22 Plan de mantenimiento preventivo

Se trata de la descripción detallada de las tareas de Mantenimiento Preventivo asociada a un equipo o maquina, explicando las acciones, plazos y recambios a utilizar; en general, hablamos de tareas de limpieza, comprobación, ajuste, lubricación y sustitución de piezas.

2.2.23 Fallas no críticas

Avería de una unidad de equipos que no causa un cese inmediato de la capacidad para desempeñar su función requerida.

2.2.24 Estado de funcionamiento

Estado cuando un artículo desempeña o realiza la función requerida.

2.2.25 Tiempo de funcionamiento

Intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de funcionamiento.

2.2.26 Oportunidad de mantenimiento

Mantenimiento de un elemento que se desfasa para ser realizado en la mejor oportunidad planificada que se disponga.

2.2.27 Confiabilidad

Según la norma COVENIN 3049-93, la confiabilidad es la probabilidad de que un Sistema de Producción no falle bajo condiciones establecidas en un momento dado. [8]

2.2.28 Confiabilidad operacional

Es la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un con texto operacional específico. Es importante, puntualizar que en un programa de mejoras de la confiabilidad operacional de un sistema, es necesario el análisis de los cuatro parámetros operacionales que se muestran en la figura 2.1. [13]



Figura 2.1: Sistema de confiabilidad operacional.
Fuente: Confima & consultores, CA. (2008)

La variación en conjunto o individual que pueda sufrir cada uno de los cuatro parámetros presentados, afectará el comportamiento global de la confiabilidad operacional de un determinado sistema. [13]

2.2.29 Análisis de criticidad

Es una herramienta que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis de criticidad se debe: definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis. [12]

El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. La información recolectada en el estudio podrá ser utilizada para:

- Priorizar órdenes de trabajo de operaciones y mantenimiento.
- Priorizar proyectos de inversión.
- Diseñar políticas de mantenimiento.
- Seleccionar una política de manejo de repuestos y materiales.
- Dirigir las políticas de mantenimiento hacia las áreas o sistemas más críticos.

2.2.30 Metodología D.S. de análisis de criticidad

Es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones, orientando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar, basado en la realidad actual. Esta metodología va dirigida a ofrecer una herramienta que ayude en la determinación de la jerarquía de equipos de una planta, que permita manejarla de manera controlada y en orden de prioridades. [12] En la figura 2.2 se muestran los parámetros tomados en cuenta en la metodología D.S. para el análisis de criticidad.

Hay que destacar que para cada parámetro están dadas una serie de factores predeterminados por el método D.S. que pueden señalar el estado actual de la empresa tanto en el área de mantenimiento como en el operacional, cada factor esta ponderado de manera tal que arroja un valor que va del 1 al 3 de acuerdo al nivel de gravedad que este parámetro en específico presente, 1 para el menos grave y 3 para el más grave. Realizado el análisis a cada parámetro se suman las ponderaciones

resultantes obteniendo un total por cada área y se introducen en la ecuación 2.1 que se utiliza para calcular la criticidad del equipo. La matriz es flexible por cuanto se pueden incluir o quitar parámetros, en dependencia del contexto operacional a evaluar.[12]

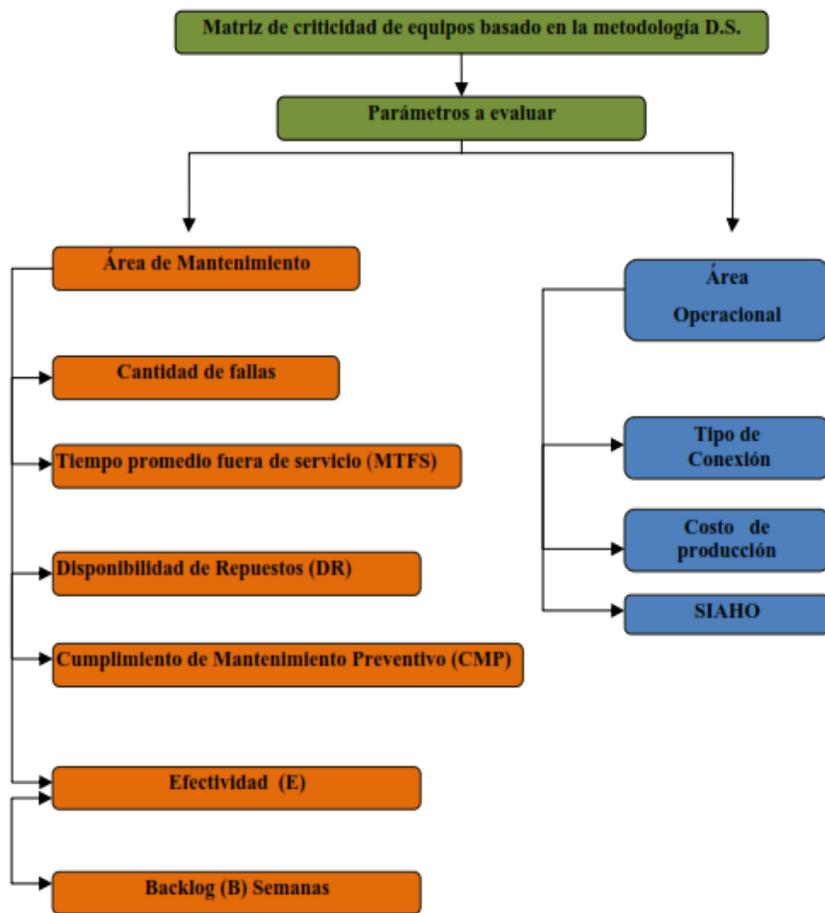


Figura 2.2 Parámetros utilizados por la metodología de análisis de criticidad D.S.
Fuente: Suárez, Diógenes (2007)

	Equipo:	Sistema:	Realizado:		
	Código:	Evento de control:			
AREA DE MANTENIMIENTO					
Factor a Evaluar	Criterios		Ponderación	Criterio Elegido	Puntos
	Rotativo	Estático			
1) Cantidad de Fallas en el periodo evaluado	1a) F= 1	0<F<1	1		
	1b) 1<F<12	1<F<3	2		
	1c) F>12	F>3	3		
2) Tiempo Promedio fuera de servicio en el periodo evaluado (MTFS) en horas	2a) MTFS ≤ 4		1		
	2b) 4 < MTFS < 8		2		
	2c) MTFS ≥ 8		3		
3) Disponibilidad de repuestos en el periodo evaluado(DR)	3a) DR ≥ 80%		1		
	3b) 50 ≤ DR < 80%		2		
	3c) DR < 50%		3		
4) Cumplimiento del mantenimiento preventivo (CMP)	4a) 75% ≤ CMP ≤ 100%		1		
	4b) 50% ≤ CMP < 75%		2		
	4c) 0% ≤ CMP < 50%		3		
5) Efectividad (E)	5a) E ≥ 80%		1		
	5b) 50 ≤ E < 80%		2		
	5c) E < 50%		3		
6) Backlog (B) Semanas	6a) 0 ≤ B ≤ 2		1		
	6b) 2 < B ≤ 5		2		
	6c) B > 5		3		
Total puntos obtenidos en el área de mantenimiento (E.A.M.)					
AREA OPERACIONAL					
Factor a Evaluar	Criterios		Ponderación	Criterio Elegido	Puntos
7) Tipo de conexión	7a) Sistema Paralelo		1		
	7b) Sistema Combinación		2		
	7c) Sistema Serie		3		
8) Seguridad industrial, ambiente e higiene ocupacional (SIAHO)	8a) Sin Consecuencias		1		
	8b) Efecto Temporal		2		
	8c) Efecto Permanente		3		
9) Costos de Producción	9a) Igual a la meta		1		
	9b) Menor a la meta		2		
	9c) Mayor a la meta		3		
Total puntos obtenidos en el área operacional (E.A.O.)					
Criticidad del equipo = [K1 * (E.A.M.) + K2 * (E.A.O.)] x 100					

Figura 2.3: Matriz para análisis de criticidad.

Fuente: Suárez, Diógenes (2007)

$$RE = \text{Crítica del equipo} = [K_1 * (\Sigma A.M.) + K_2 * (\Sigma A.O.)] \times 100 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

RE: Resultado de la Evaluación.

$\Sigma A.M.$: Sumatoria de los puntos del área de mantenimiento.

$\Sigma A.O.$: Sumatoria de los puntos del área de operaciones.

K1: 0,0278; Constante del área de mantenimiento.

K2: 0,0555; Constante del área operacional.

La constante K1 varía si la cantidad de parámetros del área de mantenimiento aumenta o disminuye, de igual modo sucede con la constante K2 pero relacionado con los parámetros del área de operaciones. Esto dado a que dichas constantes garantizan que el resultado obtenido mediante la ecuación 2.1 no exceda el 100%. Dependiendo de dicho resultado se establece que equipo es crítico dependiendo de la siguiente consideración que se observa en la tabla 2.1.a continuación se muestra la matriz para análisis de criticidad D.S.

Tabla 2.1. Parámetros para definir la criticidad de un equipo

PARÁMETROS PARA ESTABLECER CRITICIDAD
No crítico ($33\% \leq RE < 50\%$)
Semi-crítico ($50 \leq RE < 70\%$)
Crítico ($RE \geq 70\%$)

Fuente: Suárez, Diógenes (2007)

2.2.31 Equipo natural de trabajo (ENT).

Están integrados por quienes mejor conocen los equipos: personal de operaciones y de mantenimiento, cómo se muestra en la figura 2.4. Ellos definen el contexto operacional, las funciones requeridas de los equipos, sus fallas funcionales, las causas de la falla, sus efectos, sus niveles de criticidad y finalmente, la estrategia más adecuada para cada caso. Son conducidos por un Facilitador, el cual es una persona muy bien entrenado en el uso de la técnica.[5]



Figura 2.4: Equipo natural de trabajo. (2008)
Fuente: Confima & consultores, CA.

A continuación se nombran y definen los integrantes del ENT, de acuerdo a la función que cumplen dentro de una organización y al rol que juegan en el proceso productivo.

- Operadores. Personas que están día a día con el equipo y aportan conocimiento acerca de su funcionamiento, estándares operacionales, fallas y las consecuencias de las mismas.

- Supervisores. Son los encargados de garantizar el buen funcionamiento de una planta, sistema o equipo, y aportan información sobre como que se originan las fallas y las maneras de evitarlas.
- Técnicos Mecánicos, Electricistas e Instrumentistas. Encargan de reparar y realizar ajustes estratégicos en el equipo, estos aportan los conocimientos acerca de las técnicas, materiales y herramientas que deben emplearse para devolverle el estado de funcionamiento al equipo y/o lograr que este opere correctamente.
- Ingeniero en Procesos. Es la persona encargada de monitorear, evaluar y mejorar uno o varios procesos productivos, este aporta información acerca de las estrategias necesarias para obtener el máximo rendimiento de dichos procesos.
- Planificador. Responsable para determinar cuáles son las actividades de mantenimiento junto con sus frecuencias de ejecución, con el objetivo de minimizar las fallas en un equipo y alargar su vida útil.
- Supervisor de Mantenimiento. Supervisa y garantiza que las actividades de mantenimiento sean realizadas a tiempo, por personas competentes y bajo las normativas establecidas por la empresa.
- Inspector SIAHO. Son las personas encargadas de informar sobre el impacto que puede ocasionar una falla en la seguridad, ambiente e higiene ocupacional.
- Facilitador. Su labor consiste en fijar reuniones, coordinarlas y lograr que todos los miembros del grupo trabajen como un solo equipo en un ambiente de consenso y respeto mutuo.

2.2.32 Funciones ENT

Es lo que se desea que un equipo haga para cumplir el propósito por el cuál fue diseñado e instalado.

2.2.32 Falla funcional ENT

Es la Incapacidad del equipo o elemento físico para satisfacer un criterio de funcionamiento deseado (Pérdida de una Función, parcial o total).[13]

2.2.33 Modos de falla

Un modo de falla es una posible causa por la cual un equipo puede llegar a un estado de falla. También se le conoce cómo la Causa por la cual puede un equipo fallar.

2.2.34 Los efectos de falla

El “efecto de falla” es una breve descripción de “qué pasa cuando la falla ocurre”. Los efectos de falla deben indicar claramente cuál es la importancia que tendría la falla en caso de producirse.

2.2.35 Consecuencias de fallas

La falla de un equipo puede afectar a sus usuarios de distintas formas, por lo que se ha clasificado en cuatro, las cuales se mencionan a continuación. [5]

- Consecuencia de Fallas no Evidentes (Ocultas): Son aquellas fallas que no tienen un impacto directo, pero que pueden originar otras fallas con mayores consecuencias a la organización. Por lo general este tipo de fallas es generado por dispositivos de protección.
- Consecuencia en el Medio Ambiente y la Seguridad: El MCC presta mucha atención al impacto que genera en el ambiente la ocurrencia de una falla, así como

las repercusiones en la seguridad, tomando en consideración los artículos y disposiciones de leyes y reglamentos realizadas para legislar en este campo.

- Consecuencias Operacionales: Son aquellas que afectan la producción, por lo que repercuten considerablemente en la organización (calidad del producto, capacidad, servicio al cliente o costos industriales además de los costos de reparación).
- Consecuencias no Operacionales: Son aquellas ocasionadas por cierta clase de fallas que no generan efectos sobre la producción ni la seguridad, por lo que el único gasto presente es el de la reparación.

En la figura 2.5 se muestra de manera práctica y clara cada una de las consecuencias por fallas.



Figura 2.5: Clasificación de las consecuencias de las fallas
Fuente: Suárez, Diógenes (2007)

2.2.36 Fallas ocultas

Los equipos suelen tener dispositivos de protección, es decir, dispositivos cuya función principal es la de reducir las consecuencias de otras fallas (fusibles, detectores de humo, dispositivos de detención por sobre velocidad / temperatura/ presión, etc.). Muchos de estos dispositivos tienen la particularidad de que pueden estar en estado de falla durante mucho tiempo sin que nadie ni nada ponga en evidencia que la falla ha ocurrido. Este tipo de fallas se denominan fallas ocultas, dado que requieren de otra falla para volverse evidentes. [5]

2.2.37 Clasificación de los tiempos en el mantenimiento

Una vez que se ha reconocido la ocurrencia de una falla en un activo, es responsabilidad del personal de operaciones, registrar en modo eficiente, las hora de parada de dicho activo y la hora en la cual recobró su funcionamiento, para de este modo brindarle al personal de mantenimiento la información necesaria a la hora de determinar los diferentes tiempos de dicho activo relacionados con el fallo. Estos tiempos se clasifican en:

- Tiempo entre Fallas (TEF). Es el tiempo que transcurre entre la ocurrencia de una falla y otra.
- Tiempo Fuera de Servicio (TFS). Es el tiempo transcurrido desde que el equipo cesa de funcionar hasta que recobra su operatividad normal.
- Tiempo para Reparar (TPR). Es el tiempo que transcurre desde que se inician las reparaciones hasta que se culminan. Incluye algunos tiempos como: tiempo por demora de materiales, tiempo de localización de fallas, entre otros.

2.2.38 Distribución de gumbell tipo i

Conocida también como la distribución de valores extremos de Gumbell, es empleada como un método gráfico-analítico para determinar mantenibilidad; ya que es bastante fiable en sus resultados, adicional a esto es una función que obedece a la ley de los efectos proporcionales, permitiendo modelar la distribución del valor máximo y del valor mínimo, por lo cual es recomendable para calcular valores extremos. Esta distribución posee un papel conocido como papel de Gumbell, el cual es log-normal, funcional y de fácil uso en el cual se grafican los tiempos fuera de servicio (TFS) y la función acumulada de falla (Fi) en porcentaje, con el fin de diagramar una nube de puntos que se asemeje lo más posible a una recta y poder obtener de esta manera los valores del parámetros de forma (α) junto con el parámetro de posición (μ), indispensables para la estimación de mantenibilidad.

2.2.39 Distribución de Weibull

Representa uno de los métodos paramétricos empleados con mayor frecuencia para el cálculo de la confiabilidad, debido a su flexibilidad y practicidad, además, es una función asimétrica de estadística múltiple descubierta por el doctor alemán Waloddi Weibull en 1937, la cual se presenta como una aproximación de la distribución normal o como una representación de la tendencia exponencial. En esta distribución se detallan las fallas durante cualquier periodo de vida de un equipo, ya sea mortalidad infantil, operación normal o desgaste; ya que describe la tasa de falla cuando esta crece, se mantiene constante o decrece. La conforman tres parámetros principales: de posición (γ), de escala (η) y de forma (β).

La distribución de Weibull posee un papel conocido como Papel de Weibull, el cual es log-log y contiene cuatro (4) ejes, dos ejes X-Y principales y dos ejes X-Y auxiliares. En los ejes principales de este papel se grafican los tiempos entre fallas

(TEF) y la función acumulada de falla (Fi) en porcentaje, con la finalidad de graficar una nube de puntos que se asemeje lo más posible a una recta. Mientras que los ejes secundarios permiten obtener los valores de los parámetros de escala (η) y de forma(β), indispensables para la estimación de la confiabilidad, una vez que se traza la recta y se hace cruzar por dichos ejes una paralela a ella.

2.2.40 Parámetros de mantenimiento

Los parámetros de mantenimiento se definen como una serie de indicadores estadísticos basados en la teoría de probabilidad, que permiten monitorear y evaluar el comportamiento de una instalación, sistema, equipos y componentes, así como, cualificar la gestión del mantenimiento. Entre ellos destacan: Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF), Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS), Tiempo Promedio Para Repara (TPPR), Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.[2]

- Confiabilidad

Es la probabilidad de que un sistema, equipo o componente opere sin fallar por un determinado periodo de tiempo, bajo unas condiciones de operación previamente establecidas. También se puede definir como la probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe en forma satisfactoria la función que le fue asignada, bajo ciertas condiciones de uso durante un tiempo dado.

La confiabilidad se calcula mediante la ecuación 2.2 que se muestra a continuación.

$$R_{(t)} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde:

t: Tiempo en el cual se quiere estimar la confiabilidad.

Υ : Parámetro de posición.

η : Parámetro de escala de la recta de Weibull.

β : Parámetro de forma de la recta de Weibull.

A continuación se mencionan y definen cada uno de los parámetros necesarios para determinar la Confiabilidad.

- a. Parámetro de Posición (γ). Es el parámetro que define si la nube de puntos en el papel de Weibull se ajusta a una recta. Se refiere al tiempo probable en el cual se inician las fallas y presenta dos posibles casos de estudio.
 1. Si se puede ajustar la nube de puntos a una recta, entonces $\gamma = 0$.
 2. Si la nube de puntos representa una curva, entonces $\gamma \neq 0$.
- b. Parámetro de Escala (η). Es un parámetro que ayuda a definir la vida característica de un equipo y corresponde al tiempo para el cual los equipos tienen una probabilidad de fallar de 63,2 %, la cual pasa por el punto Weibull. La vida característica de un equipo se calcula mediante la ecuación 2.3.

$$\text{Vida característica} = \eta + \gamma$$

Ec. (2.3)

Donde:

Υ : Parámetro de posición.

η : Parámetro de escala.

- c. Parámetro de Forma (β). Define en qué fase de la vida se encuentra el componente o equipo, es decir su posición en la curva de la bañera. En la Figura 2.6 se muestra la Curva de la Bañera, que es una representación gráfica de la tasa de fallas con respecto al tiempo.

En donde:

$\beta < 1$ se conoce como Mortalidad Infantil y es el periodo de inicio de operación del activo, donde ocurren fallas prematuras debidas a defectos de diseño no detectados, errores de fabricación y montaje, etc.

$\beta = 1$ se conoce como Operación Normal y en este periodo las fallas son totalmente aleatorias, donde no dependen del tiempo transcurrido desde la última falla. La Tasa de Fallas es constante.

$\beta > 1$ se conoce como Envejecimiento o Desgaste y representa el periodo donde los componentes del equipo sufren un deterioro físico debido al prolongado tiempo de servicio.

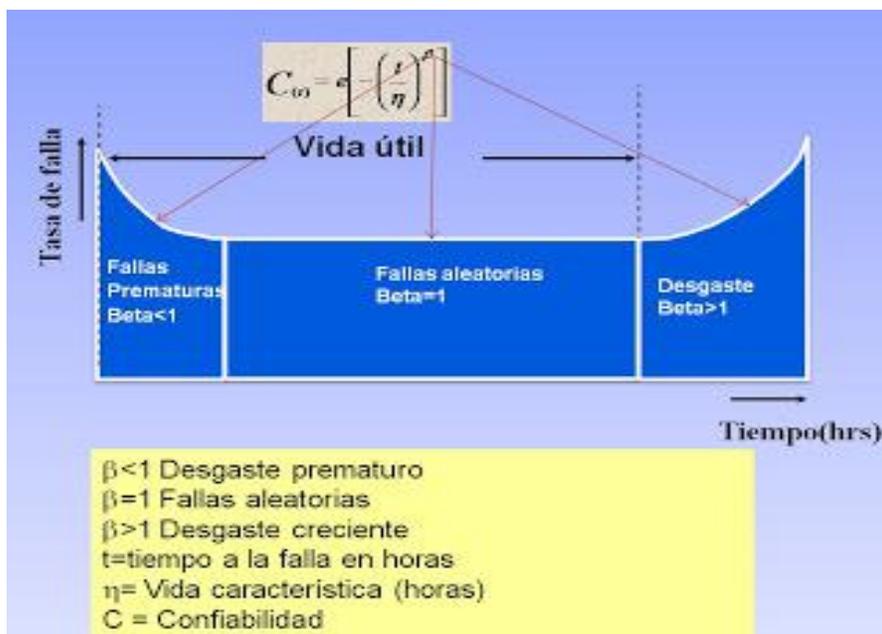


Figura 2.6. Curva de la bañera
Fuente: Confima & Consultores.

- Mantenibilidad

Representa la probabilidad de que un activo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir con su función en un tiempo dado, luego de que se haya manifestado una falla. Este parámetro se calcula mediante la ecuación 2.4.

$$M(t) = e^{-e^{-a(t-\mu)}} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde:

a: Parámetro de Forma, es el inverso de la pendiente de la recta de Gumbell.

t: Tiempo para el cual se desea saber la probabilidad de restauración.

μ : Parámetro de posición, se refiere a la media característica de reparación.

- Disponibilidad

Es la probabilidad de que un activo se encuentre disponible para su uso y en condiciones de operación durante un periodo de tiempo establecido. La ecuación 2.5 permite calcular la disponibilidad.

$$D_T = \frac{T.P.E.F.}{T.P.E.F. + T.P.F.S.} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde:

T.P.E.F.: Tiempo promedio entre fallas del historial de fallas.

T.P.F.S.: Tiempo promedio fuera de servicio del historial de fallas.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Representa el conjunto de acciones destinadas a describir y analizar el problema planteado, mediante procedimientos específicos que incluyen técnicas de observación y recolección de datos para su posterior análisis. Estas determinarán el “cómo” se realizará el estudio. Esta tarea consiste en hacer operativo los conceptos y elementos relacionados con el problema en estudio.

En virtud de lo anterior, el presente trabajo de grado se desarrollo empleando las estrategias de Investigación Documentale Investigación de Campo. La primera de estas se baso en la revisión de fuentes y documentos bibliográficos, manuales de operación, especificaciones técnicas y procesos asociados que lleva a cabo el equipo, así como consultas de criterios y metodologías de mantenimiento de diversos autores. Todo ello permitió conocer la configuración y el funcionamiento de los subsistemas que conforman los motores Waukesha. Contribuyendo de este modo al diagnóstico de su condición actual, además de un análisis sistemático de los problemas de la realidad operacional, con el propósito de detectarlos, describirlos y definir sus posibles causas y efectos, con el fin de poder predecir su comportamiento en el tiempo, basado en el enfoque de su entorno operacional donde conviven las personas y las maquinarias en estudio.

3.1 Nivel de investigación

Está referido a la forma como se abordará el estudio de fenómenos o problemática planteada. Ella puede ser de tipo experimental, de campo y documental. En los dos (02) últimos tipos de investigación se basará el siguiente trabajo de grado.

Dicho trabajo de grado se centró en la descripción de registros, datos y su posterior análisis para comprender e interpretar la naturaleza actual y la composición de las variables del proceso o fenómeno en estudio.

Según Arias (2004), expresa que la investigación documental “es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas”. (p. 25). Para llevar a cabo de manera satisfactoria la investigación se necesita la definición de los requerimientos que permitirán dar soporte y mayor veracidad al estudio para realizar y obtener nuevos conocimientos del análisis. También dice que la investigación de campo “consiste en la recolección de datos directos de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variables alguna”. (p.94).

3.2 Diseño de investigación

Según Arias (2006) “El diseño de la investigación es la estrategia que adopta el investigador para responder el problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo e investigación experimental” (p.26).

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó una investigación de campo basada en la recolección de datos en la maquinaria e información documental detallada en la zona de estudio, con el fin de conocer los detalles relacionados con los diagnósticos de vibraciones, condiciones del lubricante, e inspecciones visuales, así como también las diferentes funciones o cargos desempeñados en el departamento. Adicionalmente se describirán las funciones y responsabilidades del personal que conforma la sección de Ingeniería de Mantenimiento, responsables de los equipos rotativos y reciprocantes en el área de Anaco. Para ello se utilizó diferentes

metodologías que rigen la recolección y análisis de datos de vibración, igualmente el lubricante usado y las funciones del personal asociado a la toma y análisis del dato.

Por tal motivo este estudio fue por sus características un diseño mixto que permitió conocer las realidades del campo, mediante sus parámetros de estudio presentados como resultado de la investigación, con el objetivo de aportar soluciones al planteamiento del problema. Para ello se contó con el apoyo del personal del departamento, el cual consta de 1 superintendente, 1 supervisor y 8 analistas en la sección de equipos dinámicos. Todos con la experiencia necesaria para describir la situación en la que se encuentra su entorno laboral y las actividades que realizan diariamente según la programación establecida por las necesidades operacionales.

3.3 Unidades de estudio

3.3.1 Población

Se entiende por población “el conjunto finito o infinito de elementos con características comunes, para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda limitada por el problema y por los objetivos del estudio”. (Arias, 2006. p. 81).

Esta investigación posee dos tipos de poblaciones: una población humana representada por el personal de equipos dinámicos, y la población de equipos, representada por los ocho (08) motores Waukesha 7042GSI. Para este trabajo se tomará como población a todos los trabajadores y trabajadoras de la sección de equipos dinámicos que consta de un (01) superintendente, un (01) supervisor, ocho (08) analistas y los ocho (08) motores ubicados en Santa Rosa II 2000.

3.3.2 Muestra

Se entiende por muestra al "subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible" (Ob. cit. p. 83). Es decir, representa una parte de la población objeto de estudio. De allí es importante asegurarse que los elementos de la muestra sean lo suficientemente representativos de la población que permita hacer generalizaciones sobre la población en estudio.

3.3.2.1 Muestra humana

La muestra abarcó todo el personal, por ser una sección de pocas personas (10) que representan la población total. Por otra parte la sección de equipos dinámicos está dividida de la siguiente manera:

Un (01) superintendente, coordinador de enlace con las otras funciones de la corporación.

Un (01) supervisor, coordinador de las actividades del personal y otros detalles propios de la sección.

Ocho (08) analistas, los cuales se encargan de recolectar la data, realizar los análisis y sus respectivas recomendaciones.

3.3.2.2 Muestra de equipos

Representada por los ocho (08) equipos reciprocantes anteriormente mencionados.

3.4 Técnicas de recolección de datos

Se emplearon las siguientes técnicas de recolección de datos con la finalidad de obtener la información requerida para su posterior análisis que aseguren en cumplimiento de los objetivos propuestos que conlleven a las mejoras de la problemática suscitada. Según Arias (2006) “Se entenderá por técnica, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (p.67).

3.4.1 Recolección de datos primarios

“Siendo los datos primarios aquellos que surgen del contacto directo con la realidad empírica las técnicas encaminadas a recogerlos reflejarán, necesariamente, toda la compleja variedad de situaciones que se presentan en la vida real” (Sabino, 1992, p. 145).

La observación: “consiste en el uso sistemático de nuestros sentidos orientados a captar la realidad que queremos estudiar” (Sabino, 1992, p.146). Esta técnica se empleó para obtener información de forma visual de las actividades que se desarrollan dentro de la organización, aplicándose a cada procedimiento para analizar la situación actual de los objetivos, de esta manera se pudo detallar los diferentes aspectos críticos que conforman el sistema de comprensión en estudio.

La entrevista: “Es la relación directa establecida entre el investigador y su objeto de estudio a través de individuos o grupos con el fin de obtener testimonios orales” (p.100). Para ello el investigador formula preguntas a las personas y así recopilar datos que le sean de interés.

- Entrevistas no estructuradas: “se basan en una guía de asuntos o preguntas y el entrevistador tiene la libertad de introducir preguntas adicionales para precisar

conceptos u obtener mayor información sobre los temas deseados.” (Sampieri, Fernández y Baptista, 2006, p.597)

- Entrevistas estructuradas o formalizadas: “en ellas el investigador realiza su labor con base en una guía de preguntas específicas y se sujeta exclusivamente a esta.” (Sampieri, Fernández y Baptista, 2006, p.597).

Se aplicó Entrevistas no estructuradas al momento de realizar las auditorias en las diferentes áreas que conforman el departamento de operaciones y mantenimiento de la planta compresora Santa rosa II 2000, aplicada a supervisores, jefes y personal que allí labora. Con esta técnica se indagó sobre qué procedimientos y/o formatos se realizaban realmente, así como también, para conocer los aspectos más críticos que se generaron en el sistema estudiado, predominando el uso de preguntas abiertas en una conversación directa o “cara a cara”, con el fin de obtener una recopilación de información real y actual de la organización.

Sabino (2000), expone sobre éstas que: “No se guían por lo tanto por un cuestionario o modelo rígido, sino que discurren con cierto grado de espontaneidad, mayor o menor según el tipo concreto de entrevista que se realice”.

Según Sabino en lo que antes expone deja claro la facilidad que permite al investigador indagar sobre la información que desea buscar través de esta forma simple de entrevista, en realidad la misma permite al investigador mayor flexibilidad al momento de emitir un juicio sobre un determinado momento durante la investigación; por tanto la rigidez que pudiera limitar la forma de búsqueda de la información. Hay mayor libertad para encontrar la realidad de los hechos.

3.4.2 Investigación documental

Para profundizar aun más en la problemática planteada y tener basamentos teóricos que permitieron presentar mejoras viables en esta investigación, se utilizó como soportes de apoyo: libros, publicaciones en internet, tesis de grado, manuales de Normas COVENIN, investigaciones periódicas, entre otros; con el propósito de ampliar los conocimientos. Según Tamayo y Tamayo (1999) “la consulta documental se realiza a través de documentos, los cuales se respaldan y acreditan el escrito, siendo estas fuentes necesarias para la investigación”. Con el análisis de esta técnica se obtuvo información que sirvió para el desarrollo de cada objetivo dentro de la organización.

3.5 Instrumentos de recolección de datos

La definición de instrumento de recolección de dato según Arias (2006) “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p.69).

El proceso de recolección de información se realizó mediante visitas a planta, revisión de manuales técnicos y consultas al personal que allí laboran durante el periodo de estadía motivo de pasantía en mencionada planta, esto permitió conocer el funcionamiento interno de la planta y sus equipos, así como los conceptos de planificación estratégica manejados dentro de la misma (misión, visión y objetivos estratégicos).

Como instrumento se utilizaron listas de verificaciones de parámetros operacionales tales como: reportes, fichas técnicas, tablas alusivas a los subsistemas y sus componentes asociados para describir características técnicas de cada uno de

ellos. E igualmente se utilizó una libreta de anotaciones para identificar los puntos más relevantes referentes a la investigación.

3.6 Técnicas de análisis de datos

Se emplearon diversas técnicas para el análisis de los datos suministrados a través de las técnicas e instrumentos de recolección de datos, entre las que se detallan a continuación:

3.6.1 Diagrama de flujo

Permitió representar gráficamente la secuencia de rutinas simples del proceso analizado, las unidades involucradas y los responsables de su ejecución. Según Chianenato Idalberto (1993), el flujograma o diagrama de flujo, es una grafica que representa el flujo o la secuencia de rutinas simples.

3.6.2 Mapa de procesos

Se utilizó para representar gráficamente un proceso que ilustran en forma detallada todos los pasos de forma secuencial. También se identifico las variables claves del proceso, tanto de entrada como de salida. El propósito es el de identificar los sistemas de medición que requieren ser analizados, establecer las variables críticas para facilitar su estudio identificándolas para estudiar oportunidades para simplificar el proceso. Según la norma ISO 9000:2005 establece que un proceso es “un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

3.6.3 Diagrama de torta

Este diagrama se utilizó para mostrar gráficamente en el capítulo IV los resultados obtenidos de los objetivos planteados. Siendo este un método de representación gráfica utilizado por lo general en estadística, para mostrar como una cantidad total se reparte en un grupo de categorías.

3.6.4 Análisis de criticidad

Esta metodología que permitió establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilitó la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando esfuerzos y recursos en áreas donde es más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual. Según Cuatrecas (2002), el análisis de criticidad es una metodología con la cual es posible jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global y basada en la realidad actual, con el fin de facilitar la toma de decisiones acertada y efectiva, direccionando el esfuerzo y los recursos en las áreas donde sea más importante.

3.6.5 Metodología DS (Diógenes Suarez)

Esta herramienta fue utilizada para el análisis de los equipos que conforman el Subsistema Motor para determinar cuál de estos pudiesen generar un impacto elevado en el componente e así tomar decisiones y dirigir los esfuerzos al componente de mayor afectación. es una metodología diseñada por el Ing. MSc. Diógenes Suarez, la cual se encarga de determinar la criticidad de equipos o componentes basándose en estudiar factores pertenecientes al área de mantenimiento y al área operacional, con el fin de ponderarlos y determinar así la criticidad (Ver tabla 3.13).

Para cada factor a evaluar dentro de la matriz están dados unos intervalos de valores entre uno (01) y tres (03) que pueden ayudar a establecer el estado actual de los equipos, tanto en el área de mantenimiento como operacional, así como conocer el nivel de gravedad de cada factor evaluado. Una vez hecho el análisis a cada factor se suman las ponderaciones resultantes, obteniendo un total por cada área mediante el cálculo de la ecuación 3.8.

3.6.6 Análisis de modo y efecto de falla

El AMEF es un procedimiento disciplinado que se utilizó para identificar las formas en que el proceso estudiado puede fallar, para luego plantear soluciones predictivas de tales fallas. Según Salazar (2009) es un proceso estructurado para el análisis de funciones, modos de falla y efectos de fallas, que permite la selección de tareas de mantenimiento que busquen evitar o disminuir las consecuencias asociadas a las fallas.

3.6.7 Análisis causa-raíz (ACR)

Es un análisis bien orquestado, sincronizado y documentado de las causas raíz y un método especial para la toma de decisiones, es un acercamiento consiente paso a paso para sistemáticamente solucionar problemas, tomar buenas decisiones, analizar riesgos y oportunidades potenciales, dicha herramienta nos permitió ver la extensa panorama de problemas a través de hipótesis planteadas por el ENT, hasta llegar a la causa raíz del cual se originó la falla, ya sea por factores humanos, físicos, condiciones del medio ambiente, entre otras.

3.6.8 Matriz esfuerzo- impacto

Esta matriz consistió en jerarquizar y/o priorizar procesos, sistemas y equipos que integran el sistema estudiado, empleando factores ponderados, la cual permitió determinar cual componente requiere mayor esfuerzo al momento de restaurar el sistema y hallar aquel que mayor impacto le genera a este.

3.7 Desarrollo de la investigación

A continuación se muestran de forma sistemática y ordenada el procedimiento, las técnicas, herramientas y la ejecución en que se desarrolló cada etapa en esta investigación, cumpliendo así los objetivos propuestos, a fin de lograr el Diseño de un plan de Mantenimiento Preventivo, describiéndose el procedimiento metodológico a cada uno de los objetivos, tal y como sigue:

3.7.1 Descripción del contexto operacional de los motores Waukesha I 7042 GSI

La información que contiene esta etapa, fue obtenida y recabada mediante el uso de técnicas de recolección o recopilación de información, tales como: documentación existente y observaciones directas en la unidad a estudiar.

Esta fase consistió en la descripción de cada una de las herramientas y equipos utilizados por el personal de Ingeniería de Mantenimiento de Compresión Gas Anaco, necesaria para la toma de data y posterior estudio del comportamiento de las máquinas.

Para ello se necesitó la ayuda del Equipo Natural de Trabajo (ENT), que proporcionó datos del complejo Santa Rosa II 2000 que sirvieron para describir las especificaciones técnicas de los motores Waukesha 7042 GSI dadas por el fabricante.

En esta investigación también se les realizó entrevistas informales a las personas que integran ENT con el fin de establecer las funciones de los equipos. Todo esto permitió describir la situación actual de las unidades.

Debido a que todas las unidades del complejo Santa Rosa II 2000 poseen las mismas especificaciones, esta investigación se enfocó más directamente en los datos proporcionados por el ENT de la Unidad Motocompresora K-4. La tabla 3.1 la cual muestra los integrantes del ENT de la Unidad Motocompresora K-4.

Tabla 3.1. Equipo natural de trabajo de la unidad motocompresora K-4.

 ENT UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4		
Nombre	Cargo	ENT
Manuel Rodríguez	Operador de Planta	Operaciones
Legio Chacín	Supervisor de Planta	Operaciones
Jean Izquierdo	Técnico Mecánico	Mantenimiento
Iván Medina	Técnico Instrumentista	Mantenimiento
Iván Escalona	Supervisor de Mantenimiento	Mantenimiento
Juan López	Planificador	Mantenimiento
Luis Moya	Ingeniero de Compresión	Operaciones
Orlando Caraballo	Inspector SIAHO	Seguridad

Fuente: PDVSA Gas Anaco.

3.7.2 Identificación de fallas potenciales en los motores Waukesha 17042 GSI mediante un análisis de modo y efecto de falla (AMEF).

Para desarrollar este objetivo, se empleó la matriz de Impacto – Esfuerzo de forma esquemática, para lograr un macro – análisis del equipo en cuestión y ubicar el subsistema más propenso y de mayor importancia a la hora de un problema en el funcionamiento del equipo. Dicha matriz se enfocó en jerarquizar y/o priorizar cada uno de los subsistemas compuestos por el equipo y determinar cuán importante indispensable puede ser éste en el momento de una falla.

También se realizó un Análisis de Criticidad para verificar el estado actual de los siete (07) motores Waukesha con la finalidad de determinar cuál de ellos es más propenso a fallar y las consecuencias que le ocasionan al sistema en general. Luego se realizó un segundo análisis de criticidad con los resultados que arrojó el primero, con el objetivo de priorizar nuevamente pero esta vez los componentes internos del subsistema más afectado y poder determinar cuál de estos es más crítico y con más probabilidad de ocurrencias de falla.

Con los datos arrojados por los análisis de criticidad, se procedió a realizar un AMEF con la ayuda del ENT (Equipo Natural de Trabajo) que conocen el comportamiento del equipo y manuales facilitados por el departamento de mantenimiento de PDVSA Gas, con el motivo de identificar las posibles fallas potenciales y sus respectivos modos, asociadas al trabajo de los equipos, que pudiesen ocasionar el incorrecto funcionamiento del componente (la pieza más crítica según el resultado arrojado mediante la segunda matriz de impacto-esfuerzo), problemas en el sistema e incluso paradas no programadas del equipo.

3.7.3 Matriz impacto-esfuerzo

La Matriz Impacto-Esfuerzo es el primer paso para la realización del Análisis de Criticidad. Esta matriz fue empleada para jerarquizar y ver la importancia del motor como subsistema, empleando factores ponderados por los operadores integrantes de la planta compresora Santa Rosa II 2000, los cuales respondieron de acuerdo a su experiencia, observaciones operacionales y normas establecidas por el departamento de mantenimiento de PDVSA Gas Anaco.

Por otra parte, se sustituyen en la ecuación 3.1 para el cálculo del Impacto los puntajes obtenidos de los criterios mayormente seleccionados, basándose en los criterios o parámetros, tal como se muestra a continuación:

$$\text{Ec. 3.1}$$

Los resultados de impacto obtenido son tabulados en la tabla 3.3 la cual indica el mayor nivel de impacto, según su ponderación:

Tabla 3.3. Cálculo del impacto para los subsistemas de la unidad motocompresora.

UNIDAD MOTOCOMPRESORA								
Impacto = (%PA x TPPR x IP) + CR + IS + IA								
Subsistema	Factores						Cálculo	Impacto
	%PA	TPPR	IP	CR	IS	IA		
Enfriamiento	6,0	4,0	0,50	5,0	35,0	30,0	$I = (6,0 \times 4,0 \times 0,50) + 5,0 + 35,0 + 30,0$	82,0
Lubricación	6,0	4,0	0,50	10,0	35,0	30,0	$I = (6,0 \times 4,0 \times 0,50) + 10,0 + 35,0 + 30,0$	87,0
Compresor	4,0	2,0	0,30	25,0	35,0	30,0	$I = (4,0 \times 2,0 \times 0,30) + 25,0 + 35,0 + 30,0$	92,4
Motor	12,0	6,0	1,0	25,0	35,0	30,0	$I = (12,0 \times 6,0 \times 1,0) + 25,0 + 35,0 + 30,0$	162,0

Fuente: El autor

Donde:

%PA: Porcentaje de Procesamiento Afectado.

TPPR: Tiempo Promedio Para Reparar.

IP: Impacto en Producción.

CR: Costos de Reparación.

IS: Impacto en la Seguridad.

IA: Impacto en el Ambiente.

Por otro parte la tabla 3.4 muestra la escala de Impacto según su clasificación de acuerdo a valores ponderados en bajo, medio y alto (1,3 y 5 respectivamente), la cual se muestra a continuación:

Tabla 3.4. Escala de impacto aplicada a los subsistema.

Evaluación Obtenida	Clasificación del Impacto	Escala
	Bajo ($3 \leq \text{Ponderación Total} \leq 32$)	1
	Medio ($32 < \text{Ponderación Total} \leq 97$)	3
	Alto ($97 < \text{Ponderación Total} \leq 162$)	5

Fuente: El autor

Esta tabla 3.4 permite establecer los diferentes niveles de impacto (bajo, medio y alta) del sistema en estudio. Igualmente considerar los aspectos relativos al esfuerzo. Este se baso en una segunda encuesta cuyo objetivo fue la determinación mediante ponderaciones de la realidad actual de los motores y su contexto operacional.

- Esfuerzo. Para la determinación del Esfuerzo, se realizó una segunda encuesta donde se involucra la realidad actual de los motores de las unidades Motocompresoras estudiadas en función de las distintas estrategias establecidas por PDVSA Gas Anaco, para asegurar los distintos recursos puestos a disposición de cada una de las acciones o tareas. La tabla 3.5 representa la encuesta utilizada para determinar el esfuerzo necesario para restablecer las condiciones operativas de los subsistemas.

Tabla 3.5. Encuesta esfuerzo aplicado a los subsistema de la unidad motocompresora.

		GUÍA DE ESFUERZO Periodo 2013 – 2014							
Facilitador:	Subsistema: Motor						Fecha:		
¿Cuál es el esfuerzo necesario para restablecer el subsistema una vez que ha presentado fallas? Seleccione con una X la escala según sea el esfuerzo									
ESFUERZO	Escala	ENT							Puntaje Obtenido
Solución directa. Se dispone de recursos propios (humano, material y repuestos)	1								1
Se identificaron alternativas de solución, sin embargo no se dispone del 100 % de los recursos para ejecutar la actividad	3	X	X	X	X	X	X	X	3
Se requiere de la intervención de especialistas externos o recursos no disponibles	5								5

Fuente: El autor

La tabla 3.5 reseña la pregunta utilizada para determinar el nivel de esfuerzo necesario para restablecer la operatividad del equipo, luego de haber presentado una falla. Se plantearon tres casos principales, las cuales se visualizan en la tabla 3.6 la cual muestra las diferentes escalas o ponderaciones a soluciones determinadas según sea el caso y el nivel de esfuerzo que requiera para restablecer los parámetros y condiciones normales de operación del equipo.

Tabla 3.6. Escala de esfuerzo para jerarquizar sistemas

ESFUERZO	ESCALA
Solución directa. Se dispone de recursos propios (humano, material y repuestos)	1
Se identificaron alternativas de solución, sin embargo no se dispone del 100 % de los recursos para ejecutar la actividad	3
Se requiere de la intervención de especialistas externos o recursos no disponibles	5

Fuente: Confima & Consultores.

3.7.4 Matriz de análisis de criticidad para los motores Waukesha utilizando el método de PDVSA.

Esta técnica permitió conocer el estado actual de los siete (07) equipos reciprocantes, para ello se jerarquizaron e identificaron la criticidad de cada motor, tomando como referencia el historial de fallas llevadas por los operadores y sus respectivos análisis realizados mediante la Matriz de Prioridades Impacto-Esfuerzo.

El objetivo de este Análisis de Criticidad es establecer un método que sirva de instrumento en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de la planta compresora, que permitió subdividir los elementos evaluados para ser manejados de manera controlada y auditable. El método empleado será el de PDVSA. En la figura 3.1 se presenta la matriz de criticidad empleada en el estudio de los siete (7) motores Waukesha.

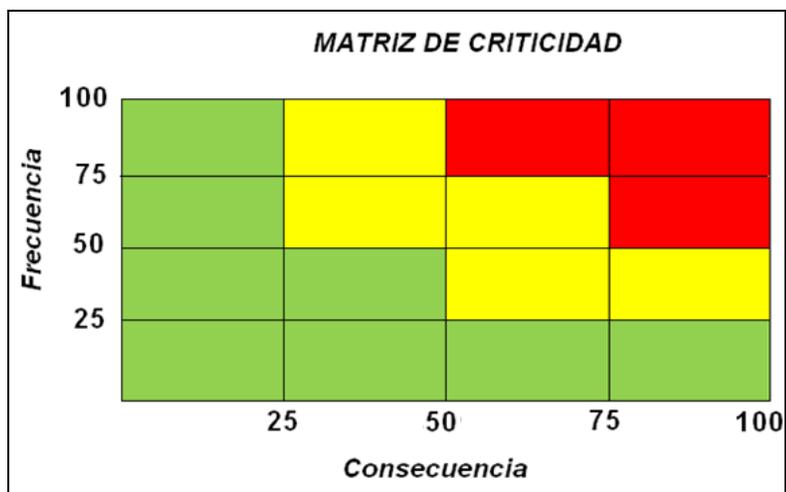


Figura 3.1. Matriz de criticidad
Fuente: Gerencia de mantenimiento PDVSA

3.7.4.1 Clasificación de los equipos según su criticidad

Los equipos se clasifican de acuerdo a su criticidad en diferentes categorías (no crítico, semi –crítico y no crítico). El resultado obtenido mediante la evaluación de los moto-compresores, se presentarán en la tabla 4.14 del capítulo IV, la cual proporciona el estado de los equipos en estudio mediante la intercepción del índice de probabilidad de falla y sus consecuencias. Esto genero el nivel de criticidad, tal como lo muestra la figura 3.2.

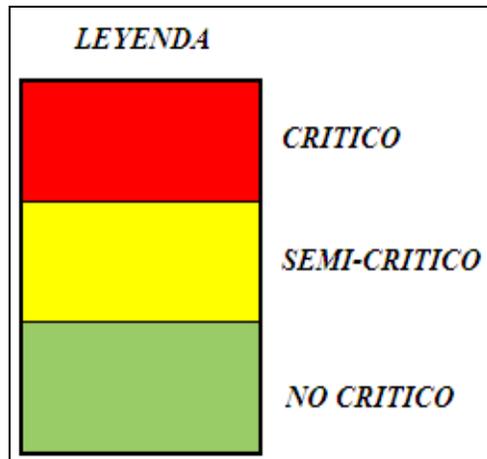


Figura 3.2. Leyenda de la matriz de criticidad
Fuente: Gerencia de mantenimiento PDVSA

3.7.4.2 Cálculos para el análisis de criticidad de los motores

Para calcular la criticidad anteriormente nombrada, es necesario tomar en cuenta aspectos y consideraciones que a continuación veremos. La criticidad se calcula mediante la siguiente ecuación (Ec. 3.2.)

$$\begin{aligned}
 &\text{CRITICIDAD} \\
 &= \\
 &(\text{Índice de Promedio de Fallas}) \times (\text{Consecuencia}) \quad (\text{Ec. 3.2.})
 \end{aligned}$$

- Parámetros considerados para el cálculo del Índice de Probabilidad de Falla (IPF).

Son parámetros establecidos por la Gerencia de Mantenimiento de PDVSA Gas Anaco, cuyas ponderaciones son mostrados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros para el cálculo del índice de probabilidad de falla.

CONDICION	VARIABLES	ESTADO	PONDERACIÓN
Integridad Mecánica (30)	Vibración	Estable	1,0
		Alarme	15,0
	Inspección	Adecuado	1,0
		Inadecuado	9,0
	Condiciones de lubricante	Dentro de la norma	1,0
		Fuera de la norma	6,0
Desempeño (45)	Cantidad de paros no programados	Alto $F > 40$	6.75
		Medio $12 < F < 40$	3,0
		Bajo < 12	1,0
	Tiempo promedio para fallar (TPPF)	Alto $TPF > 744$	1,0
		Medio $350 < TPF < 744$	6,0
		Bajo $TPF < 350$	11.25
	Horas de servicio (HS)	Excedido	9,0
		Alarma	4.5
		Normal	1,0
	Contexto de diseño Vs. Contexto operacional	Cumple	1,0
		No cumple	9,0
	NA. Número de arranque (cada 6 meses)	Alto $N_a > 6$	9,0
Medio $< 3N < 6$		4.5	
Bajo $N_a < 3$		1,0	
Control Y Protección (20)	Condiciones de monitoreo y control	Adecuado	1,0
		Inadecuado	3,0
		No existe	6,0
	Puesta a tierra	Adecuado	1,0
		Inadecuado	2,0
		No existe	3,0
	Protección contra incendio	Cumple	1,0
		No cumple	8,0
Protección eléctrica	Cumple	1,0	
	No cumple	3,0	
Otras condiciones (5)	Inventarios de repuestos	Bueno	1,0
		Regular	3,0
		No existe	5,0

Fuente: Gerencia de mantenimiento PDVSA

Fuente: El autor

La tabla anteriormente mostrada reseña una serie de condiciones evaluativas de las variables consideradas para el estudio y las cuales se basaron en las ecuaciones o consideraciones siguientes:

INTEGRIDAD MECÁNICA

=Vibración + Inspección + Condiciones del lubricante (Ec. 3.3)

DESEMPEÑO

= Cantidad de Paros No Programados + TPPF + HS
+ (Contexto de diseño Vs Contexto operacional) + NA (Ec. 3.4)

CONTROL Y PROTECCIÓN

=Condiciones de monitoreo y control + Puesta a tierra
+ Protección contra incendio + Protección eléctrica (Ec. 3.5)

OTRAS CONDICIONES

=Inventarios de repuestos (Ec. 3.6)

Por otra parte en las tablas (3.8; 3.9; 3.10 y 3.11), se muestran los calculos resultantes de las evaluaciones realizados a los motores basadas en las ecuaciones (3.2; 3.3; 3.4 y 3.5) respectivamente. Dichos resultados se pueden observar a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 3.8. Cálculo de integridad mecánica

Integridad Mecánica	Vibración	Inspección	Condiciones de lubricante	ΣF
Motor 1	1,0	1,0	6,0	8,0
Motor 2	1,0	1,0	1,0	3,0
Motor 3	1,0	1,0	1,0	3,0
Motor 4	15,0	1,0	1,0	17,0
Motor 5	1,0	1,0	6,0	8,0
Motor 6	1,0	1,0	1,0	3,0
Motor 7	1,0	1,0	1,0	3,0

Fuente: Analistas

Tabla 3.9 Cálculo de desempeño

Desempeño	Cantidad de paros no programados	Tiempo promedio para fallar	Horas de servicio	Contexto de diseño Vs Contexto operacional	Número de arranque (cada 6 meses)	ΣF
Motor 1	3,0	11.25	9,0	1,0	9,0	33.25
Motor 2	3,0	6,0	9,0	1,0	9,0	28,0
Motor 3	1,0	6,0	1,0	1,0	9,0	18,0
Motor 4	3,0	11.25	9,0	1,0	9,0	33.25
Motor 5	3,0	6,0	4.5	1,0	9,0	23.5
Motor 6	1,0	6,0	9,0	1,0	9,0	26,0
Motor 7	3,0	6,0	9,0	1,0	9,0	28,0

Fuente: Analistas

Tabla 3.10 Cálculo de control y protección

Control y Protección	Condiciones de monitoreo y control	Puesta a tierra	Protección contra incendio	Protección eléctrica	ΣF
Motor 1	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 3	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 4	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 5	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 6	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
Motor 7	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0

Fuente: El autor

Tabla 3.11 Cálculo para inventario de repuestos

Otras condiciones	Inventarios de repuestos	ΣF
Motor 1	3,0	3,0
Motor 2	3,0	3,0
Motor 3	3,0	3,0
Motor 4	3,0	3,0
Motor 5	3,0	3,0
Motor 6	3,0	3,0
Motor 7	3,0	3,0

Fuente: Analistas

El cálculo del Índice Promedio de Fallas se realiza mediante la Ecuación 3.7 que se muestra a continuación tomando en cuenta los parámetros ya establecidos anteriormente en la tabla 3.7, todo esto para llegar a un resultado total en el capítulo IV; en la tabla 3.12 se muestra un cálculo final del Índice de Falla para cada motor.

IPF

=

INTEGRIDAD MECÁNICA + DESEMPEÑO

+ CONTROL Y PROTECCIÓN + OTRAS CONDICIONES(Ec. 3.7)

Tabla 3.12. Cálculo final del índice promedio de fallas

	Integridad Mecánica	Desempeño	Control y Protección	Otras condiciones	<i>IPF</i>
Motor 1	8,0	33.25	4,0	3,0	48.35
Motor 2	3,0	28,0	4,0	3,0	38,0
Motor 3	3,0	18,0	4,0	3,0	28,0
Motor 4	17,0	33.25	4,0	3,0	57.25
Motor 5	8,0	23.5	4,0	3,0	38.5
Motor 6	3,0	26,0	4,0	3,0	36,0
Motor 7	3,0	28,0	4,0	3,0	38,0

Fuente: Analistas

- Parámetros considerados para el cálculo de la Consecuencia.

Son establecidos por la Gerencia de Mantenimiento de PDVSA Gas Anaco, cuyos datos son mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 3.13. Parámetros para el cálculo de la consecuencia

CONSECUENCIA		
VARIABLES	ESTADO	PONDERACION
Impacto en la producción (15)	Prod<33.33	1
	33.33<Prod<66.66	5
	66.66<Prod	15
Flexibilidad Operacional	Tiene Flexibilidad	1
	No Tiene Flexibilidad	10
Impacto en la seguridad personal (40)	Alto	40
	Medio	20
	Bajo	10
Impacto en la seguridad industrial (15)	Alto	15
	Medio	7.5
	Bajo	1
Impacto Ambiental (20)	Alto	20
	Medio	10
	Bajo	1
Costo Mantenimiento (10)	Alto	10
	Medio	5
	Bajo	1

Fuente: Gerencia de mantenimiento PDVSA

El cálculo de la Consecuencia se realizó mediante la Ecuación 3.8 que se muestra a continuación tomando en cuenta los parámetros ya establecidos anteriormente en la tabla 3.13, en la tabla 3.14 se muestra los cálculos para las consecuencias por cada motor.

CONSECUENCIA

=

(Impacto en la producción * Flexibilidad Operacional)

+ (Impacto en la SP)+ (Impacto en la SI)

+ (Impacto Ambiental) + (Costo Mtt.)(Ec. 3.8)

Tabla 3.14. Cálculo final de consecuencias

Consecuencia Equ	Impacto en la producción	Flexibilidad Operacional	Impacto en la SP	Impacto en la SI	Impacto Ambiental	Costo Mtt.	<i>Conse.</i>
Motor 1	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	5,0	47.5
Motor 2	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	5,0	47.5
Motor 3	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	1,0	43.5
Motor 4	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	10,0	52.5
Motor 5	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	10,0	47.5
Motor 6	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	5,0	47.5
Motor 7	5,0	10,0	10,0	7.5	10,0	5,0	47.5

Fuente: Analistas

Finalmente sustituyendo las sumatorias obtenidas en las tablas de Consecuencia y la tabla final del IPF en la Ec. 3.1, obtenemos la criticidad de los motores en la tabla 3.15:

Tabla 3.15. Cálculo final de la criticidad de los motores Waukesha.

UNIDADES MOTOCOMPRESORAS				
MOTOR	IPF	CONS.	CRITICIDAD = (IPF * CONS.)	RESULTADO
K1	48.35	47.5	48.35*47.5	2296.625
K2	38	47.5	38*47.5	1805
K3	28	43.5	28*43.5	1218
K4	57.25	52.5	57.25*52.5	3005.625
K5	38.5	47.5	38.5*47.5	1828.75
K6	36	47.5	36*47.5	1710
K7	38	47.5	38*47.5	1805

Fuente: El autor

3.7.4.3 Cálculo de criticidad para los equipos que integran el subsistema motor con la metodología D.S.

Como siguiente paso del estudio se procedió con la jerarquización de los siguientes equipos que conforman el Subsistema Motor para determinar cuál de estos pudiesen generar un mayor impacto en el motor, este está compuesto por: Arranque, Electroválvula, Válvula de Gas Combustible, Carburador, Gobernador, Generador, Cámara y Turbo, se aplicó la Matriz de Criticidad propuesta por la Metodología D.S. (Diógenes Suarez). Para la selección de los criterios de cada uno de los factores se requirió la revisión del historial de fallas, cálculos matemáticos y una encuesta realizada a los integrantes del ENT, por ser ellos las personas con la suficiente experiencia para aportar la información necesaria en las áreas de operaciones y mantenimiento, tomadas en cuenta por la metodología. En la tabla 3.16 se muestra un resumen de matriz de criticidad aplicada a cada uno de los equipos del motor.

Tabla 3.16. Matriz de criticidad de la metodología D.S.

METODOLOGÍA D.S.				
MATRIZ DE CRITICIDAD				
Equipo:	Sistema:	Evento de Control:		
AREA DE MANTENIMIENTO				
Factor a Evaluar	Criterios	Ponderación	Selección	Ptos.
1) Cantidad de fallas ocurridas en el periodo a evaluar	1a) $0 \leq F \leq 6$	1		
	1b) $6 < F < 12$	2		
	1c) $F \geq 12$	3		
2) Tiempo promedio fuera de servicio (MTFS) en horas en el periodo a evaluar	2a) $MTF \leq 4$	1		
	2b) $4 < MTFS \leq 8$	2		
	2c) $MTFS > 8$	3		
3) Disponibilidad de repuestos (DR) en el periodo a evaluar	3a) $DR \geq 80\%$	1		
	3b) $50 \leq DR < 80\%$	2		
	3c) $DR < 50\%$	3		
4) Cumplimiento de mantenimiento preventivo (CMP) en el periodo a evaluar	4a) $75\% \leq CMP \leq 100$	1		
	4b) $50\% \leq CMP < 75\%$	2		
	4c) $0\% \leq CMP < 50\%$	3		
5) Efectividad (E)	5a) $E \geq 80\%$	1		
	5b) $50\% \leq E < 80\%$	2		
	5c) $0\% \leq E < 50\%$	3		
6) Backlog (B) en semanas	6a) $0 \leq B \leq 2$	1		
	6b) $2 < B \leq 5$	2		
	6c) $B > 5$	3		
Total puntos obtenidos en el área de mantenimiento				
AREA OPERACIONAL				
Factor A Evaluar	Criterios	Ponderación	Selección	Ptos.
7) Tipo de Conexión	7a) Sistema Paralelo	1		
	7b) Mixto - complejo	2		
	7c) Sistema Serie	3		
8) Costos de Producción en el periodo a evaluar	8a) Igual a la Meta	1		
	8b) Menor a la Meta	2		
	8c) Mayor a la Meta	3		
9) Seguridad (seg.) del personal, equipos y/o ambiente (amb.)	9a) Sin consecuencia	1		
	9b) Efecto temporal sobre Seg y/o Amb.	2		
	9c) Efecto permanente sobre seg y/o Amb	3		
Total puntos obtenidos en el área operacional				

Fuente: Confima & Consultores.

3.7.4.4 Clasificación para equipos según la criticidad por Metodología D.S.

A continuación la tabla 3.17 muestra cómo será la clasificación de los equipos según el valor de criticidad obtenido empleando la Metodología D.S.

Tabla 3.17. Clasificación para equipos según la criticidad empleando la Metodología D.S.

Evaluación Obtenida	Criticidad del Equipo	Clasificación
	$(32 \% \leq \text{Ponderación Total} < 50 \%)$	No Critico
$(50 \% \leq \text{Ponderación Total} < 70 \%)$	Semi-Critico	
$(\text{Ponderación Total} > 70 \%)$	Critico	

Fuente: Confirma & Consultores

A continuación la ecuación 3.7.4.5 Cálculos para el análisis de criticidad para los equipos que integran el subsistema motor

3.9 muestra como calcular la Criticidad para equipos.

(Ec. 3.9)

Donde:

K_1 : Constante del Área de Mantenimiento. Su valor es igual a 0.027.

K_2 : Constante del Área Operacional. Su valor es igual a 0.055.

TPAM: Total de Puntos en el Área de Mantenimiento.

TPAO: Total de Puntos en el Área Operacional.

A continuación, se muestra el cálculo de los factores en el área de mantenimiento: Tiempo Promedio Fuera de Servicio (MTEF) en horas, Disponibilidad de Repuestos (DR), Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo

(CMP), Efectividad (E) y Backlog (B) en semanas para el equipo Cámara, tomado como ejemplo para la aplicación del Análisis de Criticidad en el periodo Enero 2013-Enero 2014. El cálculo de los factores de los equipos restantes se muestra en el Anexo F.

- Área de Mantenimiento

Nos permitirá conocer los diferentes tiempos y variables que forman parte de la estimación de los indicadores necesarios para conocer el desempeño de los motores en estudio, tales como:

a. Tiempo Promedio Fuera de Servicio (MTFS)

Permite conocer el tiempo que transcurre desde la ocurrencia de una falla hasta el arranque del equipo, tal como se muestra en la ecuación 3.10.

$$MTFS = \frac{\sum_{i=1}^n TFS}{n} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

TFS: Tiempo Promedio Fuera de Servicio.

n: Cantidad de Tiempos Fuera de Servicios.

$$MTFS = \frac{442.70}{9} = 49.188 \text{ horas}$$

b. Disponibilidad de Repuestos (DR)

Representará la relación existente entre la cantidad satisfecha (número de veces que se han solicitado repuestos y hubo entrega del mismo) con respecto a la cantidad demanda (número de veces que se han solicitado repuestos y hubo entrega o no del mismo), tal como se muestra en la ecuación 3.11.

$$DR = \frac{\text{Cantidad Satisfecha}}{\text{Cantidad Demanda}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$DR = \frac{24}{24} * 100 = 100 \%$$

c. Cumplimiento de Mantenimiento Preventivo (CMP)

Órdenes de trabajo ejecutadas con respecto a las emitidas, tal como se muestra en la ecuación 3.12.

$$CPM = \frac{\text{Ordenes de Trabajo ejecutadas}}{\text{Ordenes de Trabajo emitidas}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$CPM = \frac{3}{6} * 100 = 50 \%$$

d. Efectividad (E)

Relación entre las horas reales de aprovechamiento del equipo para la producción (Horas Efectivas) y las horas disponibles que tiene el equipo para producir, tal como se muestra en la ecuación 3.13.

$$E = \frac{\text{Horas Efectivas}}{\text{Horas Disponibles}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$E = \frac{8109.3}{8568} * 100 = 94.65 \%$$

e. Backlog en Semanas (B)

Cantidad de trabajo pendiente por realizar en un tiempo determinado, en función de las horas disponibles, tal como se muestra en la ecuación 3.14.

$$B = \frac{H-H OPR}{H-H DPS} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$B = \frac{160}{120} = 1.3$$

Donde:

H-H OPR: Horas Hombres de Ordenes Pendientes por Realizar.

H-H DPS: Horas Hombre Disponible por Semanas.

El factor Costo de Producción (CP) no pudo ser calculado, debido a políticas de la empresa PDVSA Gas Anaco.

Finalmente sustituyendo las sumatorias en los resultados obtenidos de las matrices de los subsistemas que conforman el motor (ver capítulo IV) en la Ec. 3.8, tenemos la tabla 3.18:

Tabla 3.18. Cálculo final de la criticidad para los equipos de los motores Waukesha

UNIDAD MOTO COMPRESORA K-4		
SUBSISTEMA MOTOR		
EQUIPOS	CRITICIDAD = [K1 (TPAM) + K2 (TPAO)]	RESULTADOS
Arranque	$[0.0270 * (7) + 0.055 * (5)] * 100$	46.4 %
Electroválvula	$[0.0270 * (7) + 0.055 * (7)] * 100$	57.4 %
Válvula de Gas Combustible	$[0.0270 * (9) + 0.055 * (7)] * 100$	62.8 %
Carburador	$[0.0270 * (9) + 0.055 * (7)] * 100$	62.8 %
Gobernador	$[0.0270 * (7) + 0.055 * (7)] * 100$	57.4 %
Generador	$[0.0270 * (8) + 0.055 * (7)] * 100$	60.1 %
Cámara	$[0.0270 * (10) + 0.055 * (9)] * 100$	76.5 %
Turbo	$[0.0270 * (7) + 0.055 * (7)] * 100$	57.4 %

Fuente: El autor

3.7.4.5 Análisis de modos y efectos de fallas del equipo crítico (AMEF)

Finalmente se realiza el Análisis de Modos y Efectos de Fallas del equipo crítico, lo cual inició mediante reuniones organizadas por el ENT para establecer primeramente la función del equipo en problemas dentro de su respectivo subsistema.

Posteriormente se establecieron las fallas funcionales y modos de fallas asociados a su funcionamiento, con sus respectivos efectos. Toda esta información fue suministrada por el ENT, por ser ellos los expertos y los que están relacionados en forma directa con la operación del equipo, además se consultaron manuales del fabricante, informes técnicos, notas de ingeniería y la data histórica de falla.

La información que se recabó a partir del AMEF fue ordenada, clasificada y después vaciada en los formatos de recolección. En la tabla 3.19 se muestra en resumen de la hoja de información utilizada para el AMEF que se será aplicado en el capítulo IV al componente más propenso a fallar dentro del motor.

Tabla 3.19. Resumen Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas

	Unidad:	Subsistema:	Equipo:	Hoja:	
	Realizado Por:	Revisado Por:	Fecha:	De:	
Función	Falla Funcional ¿Pérdida de función?	Modo de Falla ¿Qué causa la falla?	Efecto de la Falla ¿Qué ocurre cuando falla?		

Fuente: El autor

3.7.5 Origen de las causas o acontecimientos de los problemas los motores Waukesha L7042 a través de un análisis causa-raíz (ACR)

Para el cumplimiento de este objetivo se procedió a revisar el historial de fallas del equipo en problema perteneciente al subsistema motor, para separar aquellas que más impactan en el tiempo fuera de servicio (TFS) y así establecer un orden de

prioridades. Luego se construyó un Árbol de Fallas de la falla crítica, determinando las hipótesis que podrían originarla, y relacionándolas de manera lógica con las causas básicas que producen el modo de falla asociado al evento no deseado. Todo esto para construir un Análisis Causa-Raíz (ACR) que permitirá hallar el por qué de los eventos que se producen en el equipo en general.

3.7.6 Determinación de los parámetros de mantenimientos para los equipos críticos de la unidad motocompresora

En esta etapa con la ayuda del departamento de Confiabilidad de Equipos Dinámicos de PDVSA GAS Anaco, se trabajó con las distintas herramientas estadísticas preventivas, para ello se procedió a calcular los distintos indicadores de mantenimiento tales como: Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, la estimación de estos indicadores se realizó con el propósito de conocer el estado actual de los equipos críticos y la vida característica en la que éstos se encuentran, para así proponer acciones de intervención que mitiguen la frecuencia de fallas.

3.7.7 Cálculos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad

Para la determinación de los cálculos del equipo crítico, fue utilizado el Método Gráfico-Analítico descrito por la Distribución de Gumbell Tipo I para la estimación de la Mantenibilidad, esta distribución fue escogida por el ENT, debido a que tiene la ventaja de tener un papel bastante funcional en su uso, que permite modelar con precisión la tarea de mantenimiento considerada. Seguidamente para la obtención de la confiabilidad y disponibilidad se empleó el modelo gráfico-paramétrico de la Distribución de Weibull, así como los TPEF y TPFS respectivamente, esta distribución fue escogida por el ENT, debido a su flexibilidad y que permite representar todos los periodos de vida de un equipo, partiendo de una serie de parámetros obtenidos gráficamente se utilizaron los registros de fallas suministrados

por el ENT, elaborados por los operadores de la Planta Compresora Santa Rosa II-2000 desde Enero 2013 hasta Enero 2014, lo cual comprende el período de estudio.

- **Mantenibilidad**

El procedimiento empleado para calcular la mantenibilidad se presenta a continuación:

1. Se buscó el registro histórico de fallas del equipo, donde están contenidos los TFS pertenecientes al periodo 2013-2014, seleccionado por el Departamento de Confiabilidad para la realización del estudio. Cada valor de TFS fue ordenado en forma ascendente y le fue asignado un ordinal “i” según la posición que tenga.
2. Se calculó la función de falla acumulada $F_{(i)}$ utilizando la ecuación 3.15, puesto que el tamaño de la muestra es menor que 20, donde “i” es el número de orden correspondiente a cada TFS y “N” el número total de fallas registradas en el equipo, tal como se muestra en la tabla 3.20.

$$F_{(i)} = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} * 100 \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Ejemplo: Para $i = 1$;

$$F_{(1)} = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} * 100 = \frac{1 - 0.3}{9 + 0.4} * 100 = 7.447 \%$$

Tabla 3.20. Resultados de los TFS y % $F_{(i)}$ para la gráfica de Gumbell Tipo I.

CAMARA		
i	TFS	
1	16.20	7.443
2	20	18.085
3	23	28.723
4	28	39.362

5	29	50
6	44.30	60.638
7	64	71.277
8	67	81.915
9	151.20	92.553
TOTAL TFS		442.70

Fuente. PDVSA Gas Anaco

3. Se determinó el tiempo promedio fuera de servicio (TPFS) utilizando la ecuación 3.16.

$$TPFS_{DATA} = \frac{\sum TFS}{N} = \frac{442.70}{9} = \mathbf{49.188 \text{ Horas}} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

4. Se graficaron en el Papel de Gumbell los TFS en el eje de las ordenadas vs los valores de $\% F^{(i)}$ colocados en el eje de las abscisas, para luego trazar una recta de tendencia a mano alzada por los puntos obtenidos tal como muestra se muestra en la figura 3.3.
5. Se procedió a determinar el coeficiente de dispersión “a” mediante la ecuación 3.17.

$$a = \frac{1}{m} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde “m” es el valor de la pendiente de la recta de tendencia, y para obtenerlo, se tomaron dos (2) puntos del eje de las ordenadas y dos (2) puntos del eje de las abscisas correspondiente a dicha recta, tal como se muestra en la ecuación 3.18.

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{82 - 32}{2 - 0} = \mathbf{25} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde:

$$a = \frac{1}{m} = \frac{1}{25} = \mathbf{0.04}$$

6. Se procedió a estimar el valor de “ μ ” trazando una perpendicular al eje de las abscisas en el valor correspondiente a la acumulación de fallas igual a 37 %, hasta cortar la recta de tendencia. Luego se prolongó una línea hasta el eje de las ordenadas donde se obtuvo $\mu = 32$.

La figura 3.3 muestra los pasos 4, 5 y 6 en el papel de Gumbell.

7. Se determinó el tiempo promedio fuera de servicio de Gumbell a través de la ecuación 3.19.

$$TPFS_{GUMBELL} = \mu + \frac{0.5778}{a} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$TPFS_{GUMBELL} = 32 + \frac{0.5778}{0.04} = 46.445 \text{ Horas}$$

8. Se calculó el porcentaje de error con la ecuación 3.20, el cual debe cumplir las siguientes condiciones:
- Si el porcentaje de error es $\leq 10\%$ indica que la data histórica se ajusta a la Distribución de Gumbell.
 - Si el porcentaje de error es $> 10\%$ entonces debe trazarse una nueva línea de tendencia hasta que se cumpla con la condición propuesta, buscándose otros nuevos valores para “a” y “ μ ”.

$$\% \text{ error} = \frac{TPFS_{DATA} - TPFS_{GUMBELL}}{TPEF_{DATA}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$\% \text{ error} = \frac{49.188 - 46.445}{49.188} = 5.577 \%$$

Se puede observar que el porcentaje de error cumple con la condición planteada anteriormente, por lo cual los datos se ajustan perfectamente a la recta de tendencia trazada.

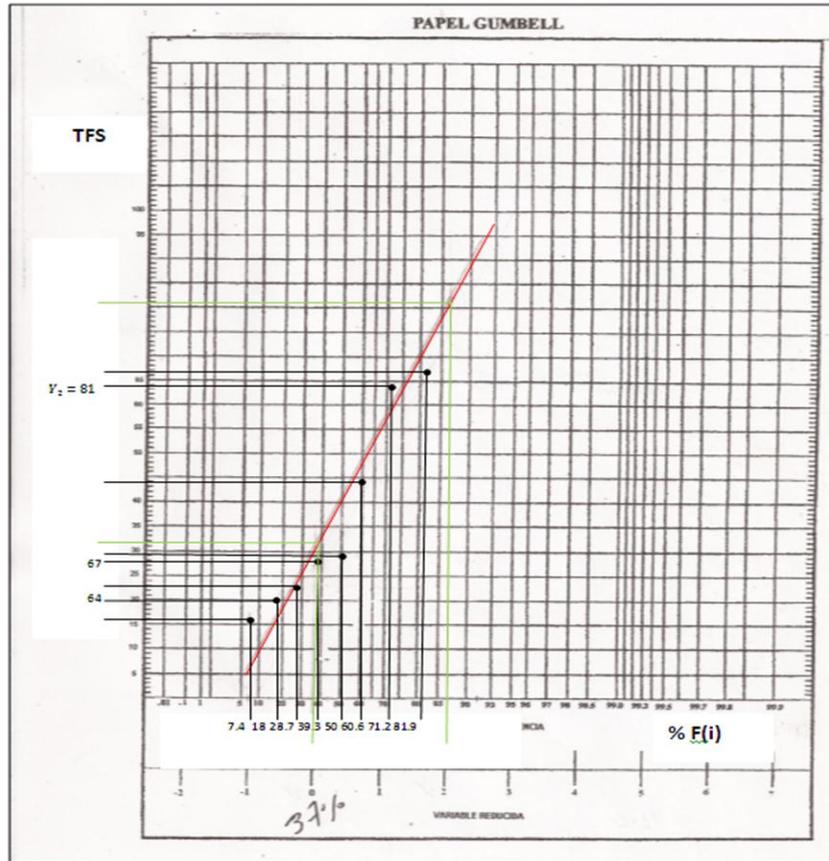


Figura 3.3. Gráfico de mantenibilidad en el papel de Gumbell tipo i.

Fuente: El autor

9. Se estimó la Mantenibilidad mediante la ecuación 3.21.

Ec. 3.21.

Una vez calculados los coeficientes, el ENT determinó estimar la Mantenibilidad para un tiempo igual al TPFS de la data, lo cual indica que la

probabilidad que la Cámara sea reparada en un tiempo igual a 49.188Horas, es de 60.482%.

$$M_{(t)} = e^{-e^{-[0.04 * (49.188 - 32)]}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$M_{(t)} = 60.482 \%$$

- Confiabilidad

El procedimiento utilizado para calcular la Confiabilidad se presenta a continuación.

1. Se buscó el registro histórico de fallas del equipo, donde están contenidos los tiempos entre fallas pertenecientes al periodo 2013-2014, seleccionado por el Departamento de Confiabilidad para la realización del estudio. Cada valor de TEF fue ordenado en forma ascendente y le fue asignado un ordinal “i” según la posición que tenga.
2. Se calculó la función de falla acumulada $F_{(i)}$ utilizando la ecuación 3.22, puesto que el tamaño de la muestra es menor que 20, donde “i” es el número de orden correspondiente a cada TEF y “N” el número total de fallas registradas en el equipo, tal como se muestra en la tabla 3.21.

$$F_{(i)} = \frac{i-0.3}{N+0.4} * 100 \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Para i = 1;

$$F_{(1)} = \frac{1-0.3}{9+0.4} * 100 = \frac{1-0.3}{9+0.4} * 100 = 7.443 \%$$

Tabla 3.21. Resultados de los TEF y % $F_{(i)}$ para la gráfica de Weibull.

CAMARA		
I	TEF	% $F_{(i)}$
1	68	7.443

2	315.20	18.085
3	407.30	28.723
4	825	39.362
5	971	50
6	1026	60.638
7	1188	71.277
8	1389	81.915
9	1857	92.553
TOTAL TEF		8046.50

Fuente. PDVSA Gas Anaco

3. Se determinó el tiempo promedio entre fallas (TPEF) utilizando la ecuación 3.23.

$$TPEF_{DATA} = \frac{\sum TEF}{N} = \frac{8046.50}{9} = \mathbf{894.055 \text{ Horas}} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

4. Se graficaron en el Papel de Weibull los valores de $\% F_{(i)}$ en el eje de las ordenadas vs los TEF colocados en el eje de las abscisas, para luego trazar una recta de tendencia a mano alzada por los puntos obtenidos.
5. Se prolongó la recta de tendencia de modo que corte con el eje "X" que se encuentra en la parte superior de la hoja de Weibull para obtener el parámetro de escala (η), cuyo valor resultó: $\eta = 1000$ Horas.
6. Se trazó una paralela a la recta de tendencia, a partir del punto de origen auxiliar (X, Y) para obtener el parámetro de forma (β), punto en el cual la recta corta la escala auxiliar "b". El resultado obtenido fue $\beta=1.4$ y debido a que la nube de puntos se aproximó a una línea recta, el parámetro de posición yes cero, ($\gamma=0$).
7. Con el valor de β se determinó el valor de A, el cual resultó $A = 0.9114$, empleando la tabla 3.22 mostrada a continuación.

Tabla 3.22. Tabla numérica de la distribución de Weibull para determinar los valores de A correspondiente a cada valor del parámetro de forma β .

β	A	B	β	A	B	B	A	B
0.20	120	1901	0.65	1.3663	2.18	1.10	0.9649	0.878

0.25	24	199	0.70	1.2638	1.85	1.15	0.9517	0.830
0.30	9.2605	50.08	0.75	1.1906	1.61	1.20	0.9407	0.787
0.35	5.0291	19.98	0.80	1.1330	1.43	1.25	0.9314	0.750
0.40	3.3234	10.44	0.85	1.0880	1.29	1.30	0.9236	0.716
0.45	2.4786	6.46	0.90	1.0522	1.77	1.35	0.9170	0.687
0.50	2.00	4.47	0.95	1.0234	1.08	1.40	0.9114	0.660
0.55	1.7024	3.35	1.00	1.00	1.00	1.45	0.9067	0.635
0.60	1.5046	2.65	1.05	0.9803	0.934			

Fuente: Confima & Consultores.

La figura 3.4 muestra los pasos 4, 5 y 6 en el papel de Weibull.

8. Luego se calculó el tiempo promedio entre fallas de la Distribución de Weibull mediante la ecuación 3.24.

$$TPEF_{WEIBULL} = A * \eta + \gamma$$

$$TPEF_{WEIBULL} = 0.9114 * 1000 + 0 = \mathbf{911.40 \text{ Horas}} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

9. Se determinó el % de error existente entre el $TPEF_{DATA}$ y el $TPEF_{WEIBULL}$ utilizando la ecuación 3.25, teniendo en cuenta que el porcentaje de error debe ser menor o igual a 5% para que la curva sea representativa de la data.

$$\%error = \left| \frac{TPEF_{DATA} - TP_{WEIBULL}}{TPEF_{DATA}} \right| * 100$$

$$\%error = \left| \frac{894.055 - 911.40}{894.055} \right| * 100 = \mathbf{1.94 \%} \quad (\text{Ec. 3.25})$$

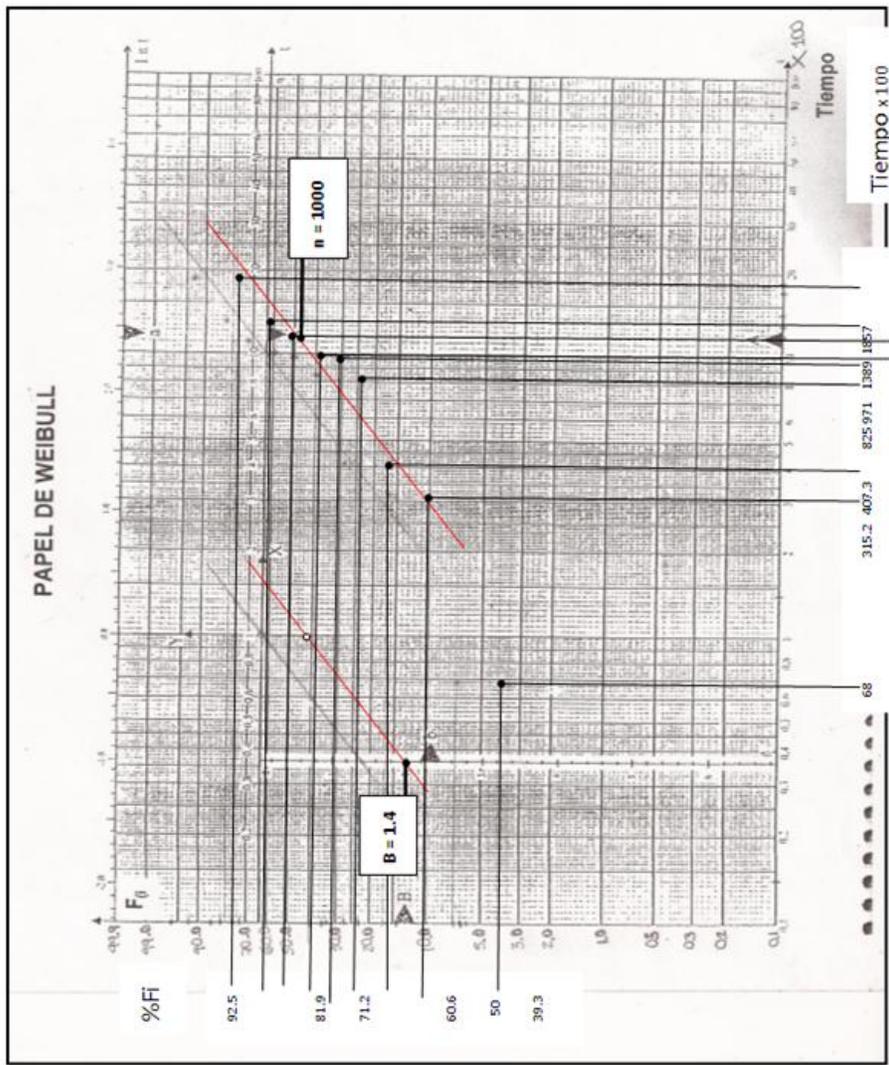


Figura 3.4. Gráfico de confiabilidad en el papel de Weibull.
Fuente: El autor

10. Se estimó mediante la ecuación 3.26 la Confiabilidad $R_{(t)}$ para un tiempo igual al TPEF de la data, que resultó ser 894.055 horas.

(Ec. 3.26)

$$R_{(t)} = e^{-\left[\left(\frac{894.055-t}{1000}\right)^{1.4}\right]} * 100$$

$$R_{(t)} = 43.33\%$$

- Disponibilidad

Para el cálculo de la Disponibilidad de la Cámara se utilizó la ecuación 3.27.

(Ec. 3.27)

$$D_{(t)} = \frac{894.055}{894.055 + 49.188} * 100$$

$$D_{(t)} = 96.36 \%$$

3.7.8 Calculo de la frecuencia de las actividades de mantenimiento a los equipos críticos de la unidad motocompresora K-4.

La frecuencia de ejecución de las actividades de mantenimiento para el equipo crítico, fue calculado en el papel, empleando la ecuación del modelo paramétrico de la Distribución de Weibull. Se procedió primeramente a despejar el tiempo de estudio (Ec. 3.28) de la ecuación de Distribución de Weibull (Ec. 3.26) y se evaluó para un η igual a 1000 y β de 1.4 siguiendo los resultados arrojados por la Hoja de Weibull (Figura 3.4), y una Confiabilidad de 90 %, tal como lo especifica la empresa PDVSA gas Anaco en sus estándares de operación, para así obtener el Tiempo de Intervención para el equipo crítico que se estudia.

(Ec. 3.26)

$$t = \gamma + \eta \left[\ln \left(\frac{1}{R(t)} \right) \right]^{1/\beta} \quad (\text{Ec. 3.28})$$

$$t = 0 + 1000 \text{ horas} \left[\ln \left(\frac{1}{0.90} \right) \right]^{1/1.4} = \mathbf{200.407 \text{ Horas}}$$

3.7.9 Plan de mantenimiento preventivo para los motores Waukesha L 7042 GSI

Tomando como base los resultados arrojados por las formulaciones en las etapas anteriores, los mismos fueron utilizados para la formulación de propuestas en función de mejoras al sistema en estudio, buscando mejorar el desempeño de la maquinaria desde el punto de vista de la estimación esto permitirá tener tiempos referenciales para las posibles fallas del sistema en estudio, indeseadas que interrumpen la producción.

Dicho Plan abarcó básicamente las acciones preventivas requeridas para el buen funcionamiento de la Unidades en estudio, haciendo uso de los resultados obtenidos de los parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad relacionados con el desempeño de los Motores de Combustión Interna antes mencionados, en general, todo contemplado en una misma visualización.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Descripción del contexto operacional de los motores Waukesha L 7042 GSI

En este objetivo se muestra el funcionamiento de la unidades Motocompresoras L7042 GSI, enfocado al subsistema motor producto del estudio, y que está directamente relacionado a la operatividad de esta unidad, lo que servirá de ayuda a identificar y solucionar los problemas detectados para los objetivos siguientes.

4.1.1 Información técnica de los motores Waukesha 7042 GSI según especificaciones del fabricante y datos proporcionados por el ENT del complejo Santa Rosa II 2000

Los motocompresores del complejo son activos que operan de manera continua, manejan un volumen de 5 MMPCED de gas natural C/U a una presión de succión de 60 lpc y lo entrega a una presión final descarga de 1200 lpc, a través de un proceso de compresión de cuatro (4) etapas realizado por un compresor reciprocante, con una potencia asociada de 1478caballos de fuerza al freno o “bhp” por sus siglas en inglés (brakehorse-power) que le transmite un motor de combustión interna de doce cilindros (12) en V. Ambos equipos se encuentran unidos mediante un acople instalado entre sus cigüeñales, esto permite transmitir el movimiento de un equipo a otro apenas se produzca el encendido del motor.

Para que la Unidades Motocompresoras tengan un correcto funcionamiento, es necesario que los diferentes subsistemas que las conforman se encuentren también en

buenas condiciones operativas, bajo esta premisa, el ENT estableció los subsistemas que la constituyen junto con sus respectivos equipos.

Para la realización del diagnóstico actual nos enfocaremos en el subsistema del motor, basado en las hipótesis del ENT, las continuas fallas de las unidades debido a este y soportadas en el historial de fallas, se priorizó este subsistema, se realizaron fichas técnicas según manuales del fabricantes y se definió sus respectivas funciones en el sistema, a continuación en la tabla 4.1 se realizó la descomposición de los subsistemas y los diferentes equipos que los constituyen.

Tabla 4.1 Subsistemas y componentes de la unidad motocompresora

 UNIDAD MOTOCOMPRESORA		
Subsistema	Equipo	Cantidad
Enfriamiento	Tanque de Expansión	1
	Radiador	1
	Bomba Principal de Agua	1
	Bomba Auxiliar de Agua	1
	Intercambiador De Calor Motor	1
	Intercambiador de Calor Compresor	1
Lubricación	Bomba Prelubricadora Motor	1
	Bomba de Aceite Motor	1
	Bomba Prelubricadora Compresor	1
	Bomba de Aceite Compresor	1
	Caja de Lubricación Forzada	1
Motor	Arranque	1
	Electroválvula	1
	Válvula de Gas Combustible	1
	Carburador	1
	Gobernador	1
	Generador	1
	Cámara	12
Turbo	2	
Compresor	Depurador	4
	Cilindro Compresor	4

Fuente: PDVSA Gas Anaco.

- Subsistema Motor

El motor se encarga de controlar y dirigir la energía de entrada que brinda el gas combustible, para transformarla en una energía mecánica de salida capaz de generar potencia de eje. Este subsistema se encuentra conectado al subsistema compresor mediante un acople mecánico, posee una relación de compresión de 10:1, la presión de combustible en su interior es de 7 lpc y pesa un total de 9300 kilogramos (kg). A continuación en la tabla 4.2 se presentan todas las especificaciones del subsistema motor.

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas del subsistema motor

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento	
Potencia	1478bhp	
Velocidad de Giro del Cigüeñal	1200 r.p.m.	
Relación de Compresión	10:1	
Numero de Cilindros	V12	
Dimensiones (alto x ancho x Prof.)	3.21 m x 2.32 m x 4.80 m	
Peso Total	9300 kg	
Presión de Aire de Arranque	150 lpc	
Presión de Combustible	7 lpc	

Fuente: PDVSA Gas Anaco

A continuación se describen los equipos que integran el sistema en estudio.

- Arranque

El arranque cumple con la función de mover el cigüeñal motor empleando una corriente de aire proveniente del cabezal general (Figura 4.1). Una vez movido el cigüeñal se accionan mediante engranes, acoplados todos los equipos relacionados con el encendido del motor. El arranque emplea aire a una presión de 150 lpc para

poder operar, girando a una velocidad de 2200 r.p.m. y desarrollando una potencia de 32 hp. Todas estas especificaciones se encuentran reflejadas en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Especificaciones técnicas del arranque

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
	EQUIPO: ARRANQUE	
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento	
Marca	Ingersoll-Rand	
Modelo	150 BMG	
Presión de Operación	150 lpc	
Velocidad de Giro	2200 r.p.m.	
Potencia	32 hp	
Lubricante Empleado	Aceite SAE-40	

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.1 Arranque
Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Electroválvula

Su objetivo es cortar el suministro de gas combustible cuando la presión disminuye por debajo de 30 lpc, a través de un accionamiento eléctrico antes que

llegue a la válvula reguladora principal (Figura 4.2). Su marca es Frank Murphy, emplea 48 voltios en corriente alterna para su funcionamiento y posee un diámetro de 2 pulgadas (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Especificaciones técnicas de la electroválvula

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4
	SUBSISTEMA MOTOR
	EQUIPO: ELECTROVÁLVULA
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento
Marca	Frank Murphy
Modelo	M2582
Diámetro	2pulg.
Voltaje	48 voltios C.A.
Presión de Operación	30 lpc
Temperatura de Operación	-20 °F - 150 °F
Fluido Manejado	Gas Natural

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.2 Electroválvula
Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Válvula de Gas Combustible

Está encargada de reducir la presión del gas combustible hasta 7 lpc antes de que ingrese al carburador para formar la mezcla de combustión (Figura 4.3). Este equipo es marca Fisher, su diámetro es de 2 pulgadas y su temperatura de operación entre -20 °F y 150 °F (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Especificaciones técnicas de la válvula de gas combustible

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
	EQUIPO: VÁLVULA DE GAS COMBUSTIBLE	
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento	
Marca	Fisher	
Modelo	299 HS	
Diámetro	2 pulg.	
Presión de Operación	7 lpc	
Temperatura de Operación	-20 °F - 150 °F	
Fluido Manejado	Gas Natural	

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.3 Válvula de gas combustible

Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Carburador

Este equipo prepara la mezcla para combustión, dosificando y añadiendo el combustible en el flujo de aire que circula a través de él (Figura 4.4). Maneja un flujo de aire de 50.000 l.p.m., la presión de gas combustible dentro de él es 7 lpc y regula la mezcla aire-combustible (M.A.C.) para una relación de 16:1 (tabla 4.6).

Tabla 4.6 Especificaciones técnicas del carburador

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4
	SUBSISTEMA MOTOR
	EQUIPO: CARBURADOR
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento
Marca	Impco
Presión de Gas Combustible	7 lpc
Relación M.A.C.	16:1
Caudal de Aire	50000 l.p.m.
Caudal de Gas Combustible	3125 l.p.m.

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.4 Carburador
Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Gobernador

Su función es controlar la velocidad del motor cuando se le aumenta la carga, manipulando la válvula mariposa del carburador través de un varillaje (Figura 4.5).

Es marca Wood Ward, tipo UG-8L vertical y gira a velocidad 1550 r.p.m (tabla 4.7). En la actualidad opera de manera inadecuada, presentando el varillaje flojo y oxidado en la estructura externa. A este equipo se le aplica fórmula desengrasante para la limpieza exterior, y se le realiza inspección visual donde se chequea condiciones estructurales con una frecuencia diaria, también se engrasa el varillaje con una frecuencia trimestral.

Tabla 4.7 Especificaciones técnicas del gobernador

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4
	SUBSISTEMA MOTOR
	EQUIPO: GOBERNADOR
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento
Marca	WoodWard
Tipo	UG-8L
Velocidad de Giro	1550 r.p.m.
Lubricante Empleado	Aceite SAE-40

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.5 Gobernador

Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Generador

Su tarea consta en enviar un pulso de corriente directa hacia cada una de las doce (12) bobinas del motor, respetando un orden específico (Figura 4.6). Induce un

pulso de 170 voltios en corriente directa, posee 12 polos y es marca Alltronic. En la tabla a continuación se muestran las especificaciones Técnicas del Generador.

Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del generador

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
	EQUIPO: GENERADOR	
Parámetro de Funcionamiento	Estándar de Funcionamiento	
Marca	Alltronic	
Voltaje (pulso)	170 voltios C.D.	
Numero de Polos	12	
Orden de Ignición por Cilindros	1L-6R-4L-3R-2L-5R-6L-1R-3L-4R-5L-2R	

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.6 Generador
Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Cámara

En el subsistema motor existen doce (12) cámaras que llevan a cabo la combustión de la M.A.C. (Figura 4.7). Posee en su interior una bujía que transmite un

pulso de corriente de 36.000 voltios encargada de la ignición dentro de los cilindros, y cuatro (4) válvulas; dos (2) de admisión y dos (2) de escape que permiten la admisión de la mezcla y el desalojo de los gases de combustión, respectivamente. Su temperatura de operación es de 1126 °F y la presión de funcionamiento es de 385 lpc. A continuación se presenta las Especificaciones Técnicas de la Cámara en la tabla 4.9 seguido de la imagen real en la figura 4.7.

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas de la cámara

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
	EQUIPO: CÁMARA	
Parámetro de Funcionamiento		Estándar de Funcionamiento
Temperatura de Combustión		1126 °F
Presión de Combustión		385 lpc
Dimensiones (alto x ancho x Prof.)		23 cm x 33 cm x 43 cm
Voltaje de emisión de Buja		36000 voltios C.D.
Numero de Válvulas		4
N° de Balancines - Varillas de Empuje		2 – 2

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.7 Cámara
Fuente: PDVSA Gas Anaco

- Turbo

Dos (2) turbos en el subsistema motor son los encargados de aspirar el aire atmosférico para ser introducido dentro del carburador, así como desalojar los gases de escape provenientes de los cilindros después de realizarse la combustión de la mezcla (Figura 4.8). Cada uno de los turbos está formado por un caracol frío y un caracol caliente, los cuales son marca ABB, giran a 13600 r.p.m. y funcionan a una temperatura de 200 °F y 950 °F respectivamente. En la tabla 4.10 se muestra las especificaciones técnicas del turbo seguido de la figura 4.8 del mismo.

Tabla 4.10 Especificaciones técnicas del turbo

	UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4	
	SUBSISTEMA MOTOR	
	EQUIPO: TURBO	
Parámetro de Funcionamiento		Estándar de Funcionamiento
Marca		Asea Brown Boveri
Potencia		150 hp
Temperatura de Caracol Caliente		950 °F
Temperatura de Caracol Frío		200 °F
Velocidad de Giro		13600 r.p.m.
Caudal de Aspiración de Aire		50000 l.p.m.
Presión de Aceite		45 lpc
Lubricante Empleado		Aceite SAE-40

Fuente: PDVSA Gas Anaco



Figura 4.8 Turbo
Fuente: PDVSA Gas Anaco

4.2.2 Descripción del Proceso de las unidades motocompresoras de la planta compresora Santa Rosa II-2000

Las Unidades Motocompresoras tienen como función comprimir 5 MMPCED c/u de gas natural desde 60 lpc hasta 1200 lpc y está conformada por dos equipos unidos entre sí mediante un acople mecánico. El primer equipo se conoce como equipo motriz y es un motor de combustión interna encargado de entregar la potencia de eje al segundo equipo, mediante el encendido por chispa. El segundo equipo se conoce como equipo movido y es quien recibe la potencia para poder operar, éste es un compresor recíprocante el cual realiza el trabajo de compresión.

El proceso de compresión del gas natural se inicia con el encendido del motor, mediante un arranque que emplea aire para accionar el cigüeñal. Una vez que el cigüeñal comienza a girar, al motor entra el gas combustible a nivel de 500 lpc proveniente del cabezal, donde pasa por varias válvulas reguladoras hasta reducir su presión a 7 lpc. Después, entra al carburador donde se une con el aire enfriado por agua y proveniente de los caracoles de aspiración de los turbos, para formar así la mezcla aire-combustible. La cantidad de mezcla destinada para la combustión es regulada por un gobernador acoplado al carburador. Esta mezcla que tiene una relación de 16:1, es enviada a las cámaras donde las bujías internas emiten un pulso de corriente de 36000 voltios a partir de un generador, para producir la ignición.

La ignición de la mezcla mueve el cigüeñal motor, el cual mediante un acople mecánico acciona al cigüeñal del compresor. Los gases de combustión producidos son desalojados hacia el escape mediante los caracoles calientes de los turbos, que a su vez accionan los caracoles de aspiración antes mencionados. Una vez que el cigüeñal compresor empieza a girar, el gas a nivel de 60 lpc entra al depurador de primera etapa proveniente del cabezal de succión, donde se separa del condensado que puede contener. Seguidamente entra en el cilindro compresor donde se comprime

contra las paredes internas, expulsándolo luego hacia el intercambiador principal o radiador, para bajar su temperatura. Este proceso se repite durante cuatro (04) etapas de compresión y finalmente el gas se envía al cabezal de descarga, con una presión de 1200 lpc. En la figura 4.9 se muestra el diagrama de procesos del Motocompresor.

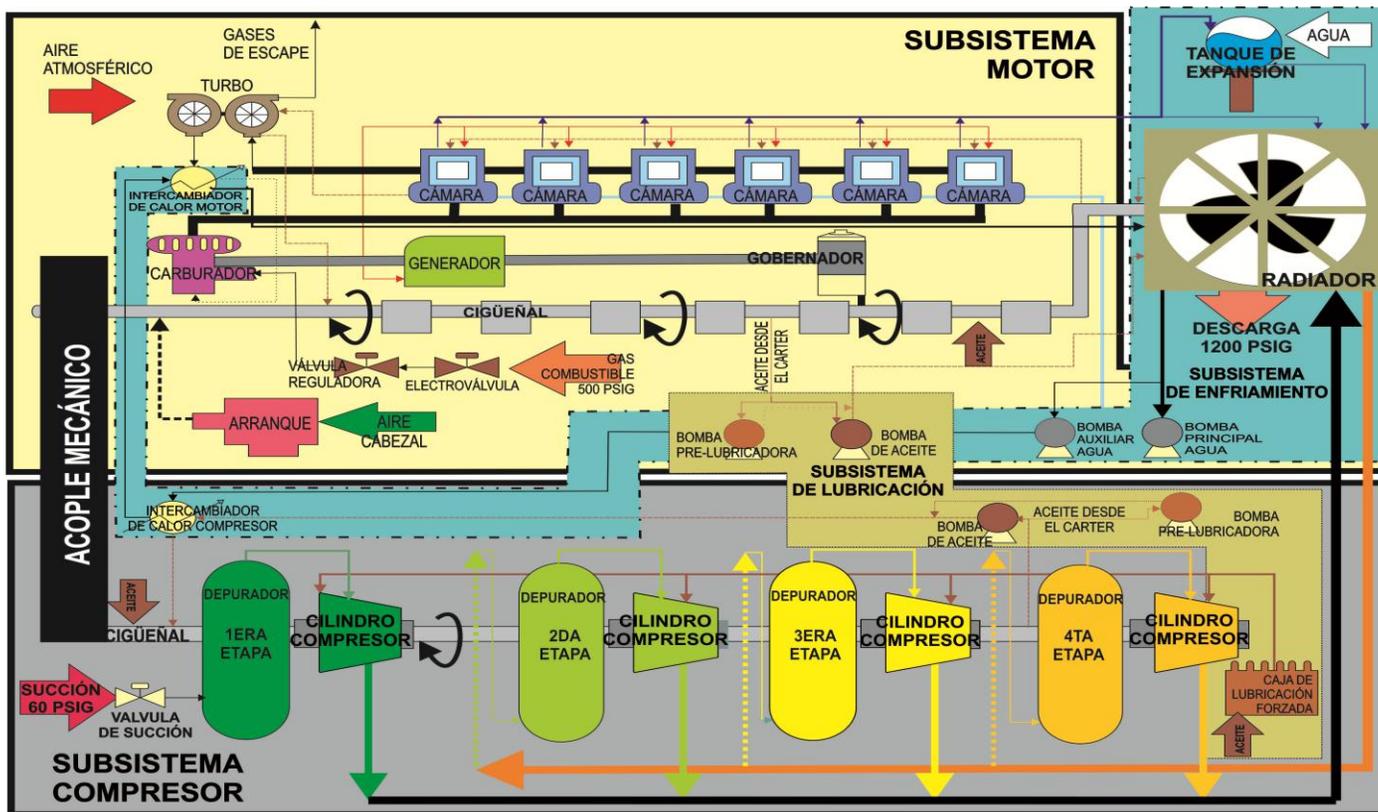


Figura 4.9 Diagrama de procesos de las unidades motocompresoras
Fuente: PDVSA Gas Anaco

4.3 Identificación de fallas potenciales en los motores Waukesha L7042 GSI mediante un análisis de modo y efecto de falla (AMEF)

4.3.1 Análisis de los resultados de la matriz impacto-esfuerzo

El ENT aseguró que la Planta Compresora Santa Rosa II-2000 no dispone del 100% de los recursos para ejecutar las actividades correspondientes a los motores Waukesha una vez que ha fallado.

Una vez realizadas las encuestas al ENT, la cual nos permitió cuantificar resultados del impacto y esfuerzo operacional, los cuales podemos observarlos detalladamente en las tablas 4.11 y 4.12 respectivamente.

**Tabla 4.11. Resultados del impacto
UNIDAD MOTOCOMPRESORA**

ESTÁNDARES DE IMPACTO		IMPACTO OBTENIDO			
Clasificación	Escala	Subsistema	Valor	Clasificación	Escala
Bajo ($3 \leq$ Ponderación Total ≤ 32)	1,0	Enfriamiento	82,0	Medio	3,0
Medio ($32 <$ Ponderación Total ≤ 97)	3,0	Lubricación	87,0	Medio	3,0
		Compresor	92.4	Medio	3,0
Alto ($97 <$ Ponderación Total ≤ 162)	5,0	Motor	162,0	Alto	5,0

Fuente: El autor

Tabla 4.12. Resultados del esfuerzo

UNIDAD MOTOCOMPRESORA			
ESTÁNDARES DE ESFUERZO		ESFUERZO OBTENIDO	
Clasificación	Escala	Subsistema	Escala
Solución directa. Se dispone de recursos propios (humano, material y repuestos)	1,0	X	1,0
Se identificaron alternativas de solución, sin embargo no se dispone del 100 % de los recursos para ejecutar la actividad	3,0	Enfriamiento	3,0
		Lubricación	3,0
		Compresor	3,0
		Motor	3,0
Se requiere de la intervención de especialistas externos o recursos no disponibles	5,0	X	5,0

Fuente: El autor

Posteriormente de haber obtenido los resultados del Impacto y el Esfuerzo, se realizó la matriz de prioridades impacto-esfuerzo, la cual nos arrojó en el impacto un total de cinco (5) puntos, que nos traduce que existe una alto impacto o consecuencia en la unidad a la hora de fallar el motor y en lo que respecta al esfuerzo, a pesar de que el personal que interactúa con estos equipos están altamente capacitados, el esfuerzo necesario para restablecer el equipo en sus parámetros normales es mucho mayor en este caso nos arrojó tres (3) puntos, debido a la insuficiencia de recursos en sus almacenes, insuficiencia de herramientas y equipos especializados para dichos motores, que facilitarían y reducirían los esfuerzos, los tiempos fuera de servicio he incrementaría considerablemente la producción.

En la tabla 4.13 se muestra los resultados de los datos generales para la construcción de la matriz de prioridades (figura 4.10) a partir de los resultados del impacto y el esfuerzo mostrada anteriormente y en la figura 4.11 presenta la distribución porcentual según la Prioridad obtenida.

Tabla 4.13. Resultados generales de la prioridad

UNIDAD MOTOCOMPRESORA										
Subsistema	Factores de Impacto						Impacto Total	Escala de Impacto	Esfuerzo	Prioridad
	% PA	TPPR	IP	CR	IS	IA				
Enfriamiento	6	4	0.50	5	35	30	82	3	3	5
Lubricación	6	4	0.50	10	35	30	87	3	3	5
Motor	12	6	1	25	35	30	162	5	3	2
Compresor	4	2	0.30	25	35	30	92.4	3	3	5

Fuente: El autor

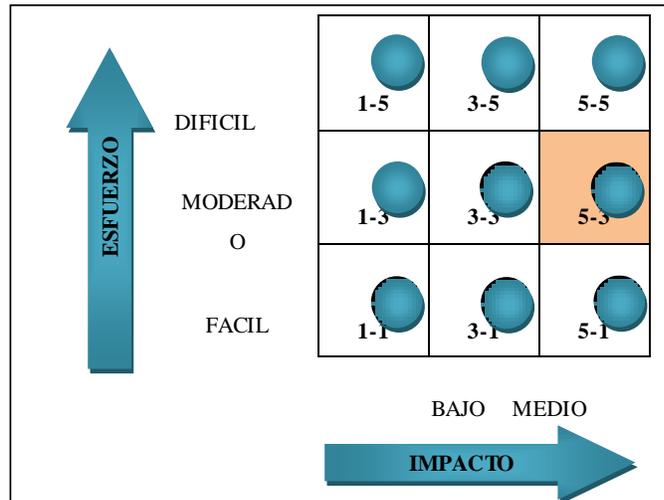


Figura 4.10. Matriz de prioridades

Fuente: El autor

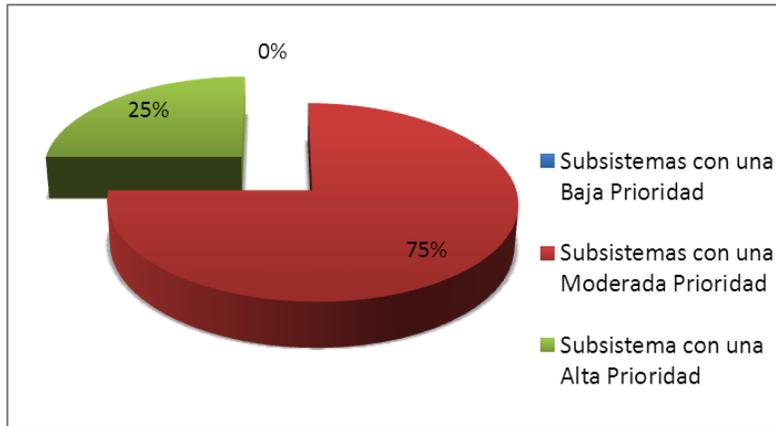


Figura 4.11. Distribución porcentual de los subsistemas de la unidad según la prioridad obtenida.

Fuente: El autor

Luego de priorizados todos los subsistemas, el ENT determinó que el subsistema motor posee una alta prioridad, con un valor de dos (2), constituyéndose como aquel que mayor impacta el proceso de compresión del gas natural.

Una vez identificado el subsistema de mayor relevancia a la hora de presentarse la falla y el que mas esfuerzo le toma al ENT restablecerlo, se procedió a realizar un análisis de criticidad de los siete (7) motores, con la finalidad de priorizar, jerarquizar en que condiciones se encuentran actualmente, y cual de ellos requiere acciones inmediatas para su mayor provecho en el futuro.

4.3.2 Análisis de los resultados de la matriz de criticidad aplicado a los motores Waukesha utilizando el método de PDVSA

Como resultado final del análisis de criticidad tenemos, que los motores K1, K2, K3, K5, K6, K7 se encuentran bajo condiciones operacionales dentro de la norma, sin embargo es importante acotar que estos valores arrojados por la matriz nos indican que están próximos a pasar a un nivel de alerta en un futuro cercano, por otra

parte el motor K4 está en un límite de alerta cercano a pasar a un nivel crítico si no se toman las medidas necesarias. Todos estos resultados se encuentran plasmados en la tabla 4.14 a continuación.

Tabla 4.14. Resultados de la criticidad de los siete (7) motores Waukesha

CRITICIDAD = (Índice de Promedio de Fallas) x (Consecuencia)			
MOTOR	FRECUENCIA	CONSECUENCIA	CRITICIDAD
K1	48.35	47.5	2296.625
K2	38	47.5	1805
K3	28	43.5	1218
K4	57.25	52.5	3005.625
K5	38.5	47.5	1828.75
K6	36	47.5	1710
K7	38	47.5	1805

Fuente: El autor

Dando a conocer que el equipo motor K4 está dentro de un nivel de alerta, es éste el que se tomara como referencia para los siguientes estudios para determinar la raíz del problema. En la figura 4.12.se muestra la Matriz de Criticidad seguido de la 4.13 que es una Distribución Porcentual de los Niveles de Criticidad de los 7 Motores Waukesha 7042 GSI.

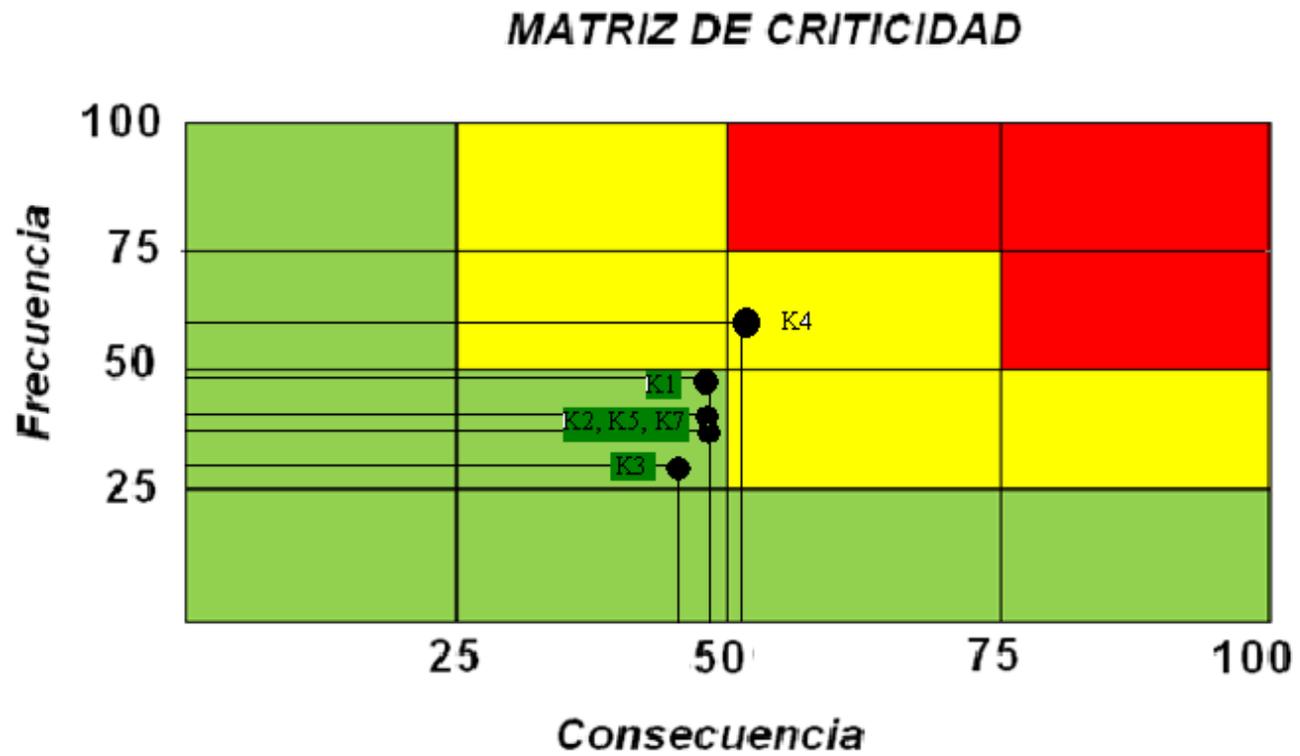


Figura 4.12. Matriz de criticidad de los motores Waukesha 7042GSI.
Fuente: El autor

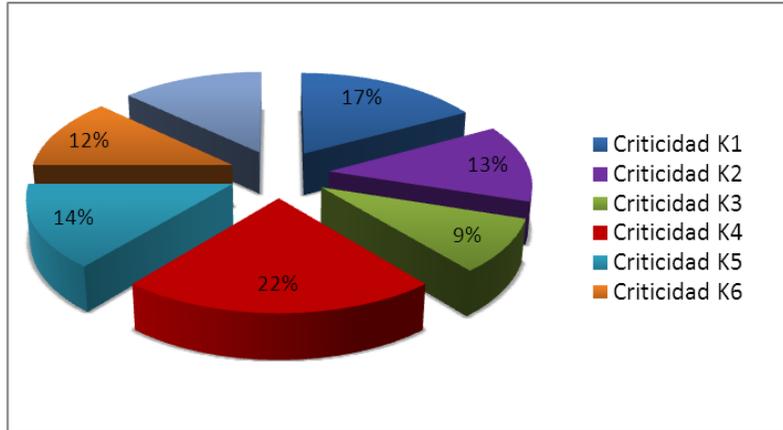


Figura 4.13. Distribución porcentual de los niveles de criticidad de los 7 motores Waukesha 7042gsi.
Fuente: El autor

4.3.3 Análisis de Criticidad para los equipos que integran el subsistema motor. Metodología D.S.

Como siguiente paso del estudio se procedió con la jerarquización (a través Metodología D.S.) de los siguientes equipos que conforman el Subsistema Motor para determinar cuál de estos pudiesen generar un mayor impacto en el motor, este está compuesto por: Arranque, Electroválvula, Válvula de Gas Combustible, Carburador, Gobernador, Generador, Cámara y Turbo.

Seguidamente en la tabla 4.15 se muestran los resultados obtenidos en el área de mantenimiento y en el área operacional para todos los equipos que conforman el subsistema motor y en la tabla inferior 4.16 se presentan clasificados de acuerdo a su nivel de criticidad como también la distribución porcentual de los equipos del subsistema motor de acuerdo al nivel de criticidad obtenido en la figura 4.14 se presenta.

Tabla 4.15. Resultados de los factores en el área de mantenimiento y en el área operacional para todos los equipos del subsistema motor

UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4											
SUBSISTEMA MOTOR											
EQUIPO	FACTORES										
	Área de Mantenimiento							Área Operacional			
	Nº F	MTFS	DR	CMP	E	B	Total	TC	CP	SEG	Total
Arranque	1	1	1	2	1	1	7	3	1	1	5
Electroválvula	1	1	1	2	1	1	7	3	1	3	7
Válvula de Gas Combustible	1	3	1	2	1	1	9	3	1	3	7
Carburador	1	3	1	2	1	1	9	3	1	3	7
Gobernador	1	1	1	2	1	1	7	3	1	3	7
Generador	1	2	1	2	1	1	8	3	1	3	7
Cámara	2	3	1	2	1	1	10	3	3	3	9
Turbo	1	1	1	2	1	1	7	3	1	3	7

Fuente: El autor

Tabla 4.16. Clasificación de los equipos del subsistema motor de acuerdo al nivel de criticidad.

UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4		
SUBSISTEMA MOTOR		
EQUIPO	CRITICIDAD	NIVEL
Arranque	46.4 %	No Critico
Electroválvula	57.4 %	Semi-Critico
Válvula de Gas Combustible	62.8 %	Semi-Crítico
Carburador	62.8 %	Semi-Crítico
Gobernador	57.4 %	Semi-Critico
Generador	60.1 %	Semi-Critico
Cámara	76.5 %	Crítico
Turbo	57.4 %	Semi-Critico

Fuente: El autor

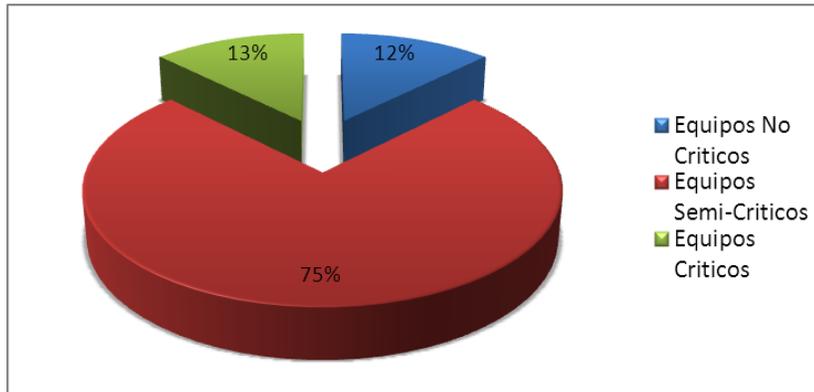


Figura 4.14. Distribución porcentual de los equipos del subsistema motor de acuerdo al nivel de criticidad obtenido.

Fuente: El autor

Una vez descompuesto el subsistema más propenso a fallas e importante, en sus componentes esenciales, se determinó cuál de estos es indispensable para el buen funcionamiento del motor y que a la hora de este fallar, el motor pasa a condiciones críticas, el análisis de criticidad por el método de D.S, determino que la cámara es el componentes más relevante y delicado de estos equipos, cuya operatividad y optimo funcionamiento dependerán en un alto porcentaje de estas, mientras que los equipos restantes: Electroválvula, Válvula de Gas Combustible, Carburador, Gobernador, Generador y Turbo resultaron con un nivel semi-crítico, así como el Arranque resultó con un nivel no crítico.

Ya conocido el equipo crítico que conforma el subsistema motor de la Unidad Motocompresora K-4, se procedió a analizar los modos y efectos de fallas del mismo, con la finalidad de tener un conocimiento más detallado referente a la función principal que realiza, las fallas funcionales y los modos de fallas que presenta con sus respectivos efectos. En la tabla 4.17 se muestra la matriz de criticidad aplicado a la cámara, las demás matrices se presentan de forma detallada en los Anexos.

4.3.4 Resultados del análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del subsistema del equipo crítico (cámara).

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas realizado a este componente del equipo crítico, se inició mediante reuniones organizadas por el ENT para establecer primeramente la función de éste dentro de su respectivo subsistema, donde se consideró que posee una única función, la cual es delimitar el espacio cerrado para que se realice la combustión de la mezcla aire-combustible (MAC). Posteriormente se establecieron las fallas funcionales y modos de fallas asociados a su funcionamiento, con sus respectivos efectos. Ver tablas N° 4.18, 4.19 y 4.20. Toda esta información fue suministrada por el ENT, por ser ellos los expertos y los que están relacionados en forma directa con la operación del equipo, además se consultaron manuales del fabricante, informes técnicos, notas de ingeniería y la data histórica de falla.

Tabla 4.18. Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara

	Unidad: K-4	Subsistema: Motor	Equipo: Cámara	Hoja: 1	
	Realizado Por:	Revisado Por:	Fecha:	De: 3	
Función	Falla Funcional ¿Perdida de función?	Modo de Falla ¿Qué causa la falla?	Efecto de la Falla ¿Qué ocurre cuando falla?		
1 Realizar la combustión de 4400 l.p.m. de la MAC con las siguientes condiciones operacionales: P = 385 lpc T = 1126 ° F	A La cámara no es capaz de realizar la combustión de 4400 l.p.m. de la MAC.	1 Bujía dañada.	No se produce la chispa para la ignición de la MAC. Se generan altos niveles de vibraciones, baja presión de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga. Los resortes no se comprimen y las válvulas dejan de actuar. Se origina golpeteo y altos niveles de vibraciones, también, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga. Las válvulas se adentran en sus asientos, los balancines dejan de trabajar y la cámara se fractura. Se produce golpeteo y altos niveles de vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de las MAC y el motor se apaga.		
		2 Balancines trancados.			
		3 Recesión de Válvulas.			

Fuente: El autor

Tabla 4.19 Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara

	Unidad:	Subsistema: Motor	Equipo: Cámara	Hoja: 2	
	Realizado Por:	Revisado Por:	Fecha:	De: 3	
Función	Falla Funcional ¿Perdida de función?	Modo de Falla ¿Qué causa la falla?	Efecto de la Falla ¿Qué ocurre cuando falla?		
1		4 Varillas de empuje dobladas	Los balancines, resortes y válvulas funcionan de manera inadecuada. Se generan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga.		
		5 Taquetes pegados.	No se accionan los balancines y las válvulas no abren ni cierran. Se generan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga.		
	B La cámara realiza la combustión de 4400 l.p.m. de la MAC a una presión y temperatura mayor de 385 lpc y 1126 ° F.	1 Desgaste en guías de válvulas.	El aceite pasa hacia el bloque de cilindros formándose depósitos de cenizas en cabezas de válvulas y pistones El consumo de aceite motor aumenta y ocurre la preignición de la MAC. La cámara realiza la combustión de la MAC por encima de 385 lpc y 1750 °F causando que el motor no mantenga sus rpm.		

Fuente: El autor

Tabla 4.20 Hoja de información para el análisis de modos y efectos de fallas de la cámara

	Unidad: K-4	Subsistema: Motor	Equipo: Cámara	Hoja: 3	
	Realizado Por:	Revisado Por:	Fecha:	De: 3	
Función	Falla Funcional ¿Perdida de función?	Modo de Falla ¿Qué causa la falla?	Efecto de la Falla ¿Qué ocurre cuando falla?		
1	C La cámara realiza la combustión de 4400 l.p.m. de la MAC a una presión y temperatura menor de 385 lpc y 1126 ° F.	2 Desgaste en resortes.	Las válvulas no cierran, se queman y ocurre la preignición de la MAC. Se originan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara realiza la combustión de la MAC por encima de 385 lpc y 1126 °F causando que el motor no mantenga sus rpm.		
		1 Ajuste insuficiente en pernos.	El agua del circuito principal, el aceite de motor y los gases de combustión se fugan por el bloque de cilindros. El consumo de gas combustible aumenta y la cámara realiza la combustión de la MAC por debajo de 385 lpc y 1126 °F causando que el motor oscile.		
		2 Ruptura en empaadura.	Los circuitos de agua principal y de aceite de motor se presurizan. El agua se contamina de aceite, ambos pasan hacia los cilindros de fuerza y el consumo de gas combustible aumenta. La cámara realiza la combustión de la MAC por debajo de 385 lpc y 1126 °F causando que el motor oscile.		

Fuente: El autor

La totalidad de funciones, fallas funcionales y modos de fallas arrojados por el Análisis de Modos y Efectos de Fallas realizado a la Cámara, se muestran en la tabla 4.21 y en la figura 4.15 se presenta la distribución porcentual de todos estos resultados.

Tabla 4.21. Resultados del análisis de modos y efectos de fallas aplicado a la cámara.

UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4			
SUBSISTEMA MOTOR			
Equipo	Funciones	Fallas Funcionales	Modos de Falla
Cámara	1	3	9

Fuente: El autor

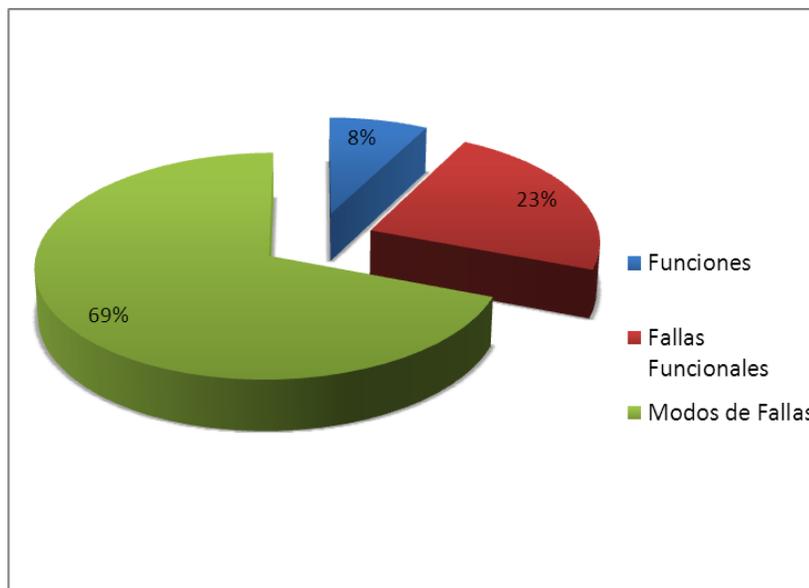


Figura 4.15. Distribución porcentual de los resultados del AMEF aplicado a la cámara

Fuente: El autor

4.4 Origen de las causas o acontecimientos de los problemas en los motores Waukesha L7042 a través de un análisis causa-raíz (ACR)

Con el objeto de saber cuál de las fallas del equipo crítico influye en mayor medida en los tiempos fuera de servicio y por lo tanto en las pérdidas de producción de la Planta Compresora Santa Rosa II-2000, se jerarquizó las fallas de acuerdo al número de ocurrencia y a los TTFS, las cuales fueron colocadas en la tabla que se muestra a continuación, a su vez determinó que para la jerarquización de las fallas bastó con revisar la data histórica correspondiente al periodo de estudio 2013-2014.

Tabla 4.22. Fallas Jerarquizadas en función al número de ocurrencia y tiempos de fuera de servicio totales

UNIDAD MOTOCOMPRESORA K-4		
Sistema: Motor		Equipo: Cámara
Aspecto	Cantidad de Fallas	TIFS (Horas)
Reemplazo de cámara por válvulas recesadas	9	442.7
Data de Falla	9	442.7

Fuente: El autor

De acuerdo con la tabla 4.21 el reemplazo de cámara por válvulas recesadas causa la totalidad de los tiempos fuera de servicio de la data y es responsable de todos los paros del equipo. El ENT estableció que las Válvulas Recesadas es la falla crítica, por tanto decidió investigar las causas raíces que ocasionan su aparición, enfocando el estudio en entender su origen por medio de factores físicos, humanos y latentes que podrían originarla; lo cual resulta ser una decisión acertada como parte de las mejoras planteadas en esta investigación. En la figura 4.11 se muestra el esquema de la Unidad Motocompresora K-4 indicando el equipo crítico.

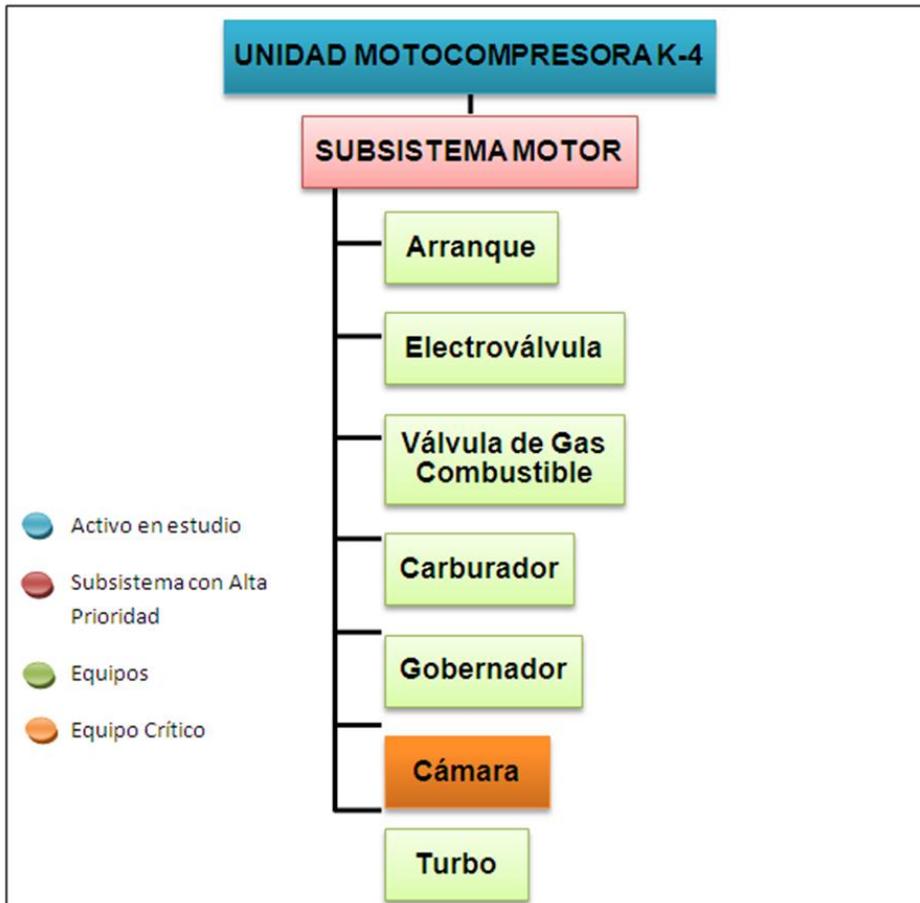


Figura 4.16. Esquema de la unidad motocompresora K-4 indicando el equipo crítico
Fuente: El autor

El ENT decidió evaluar el modo de falla más común que ha venido presentando la Cámara, siendo éste la Recesión de Válvulas, el cual fue el término técnico establecido por el ENT en el AMEF y que será empleado para el presente análisis. El Análisis Causa-Raíz de la Cámara dividido en las hipótesis que podrían causar la falla de la misma se muestra en el Árbol de Fallas a continuación en la figura 4.17.

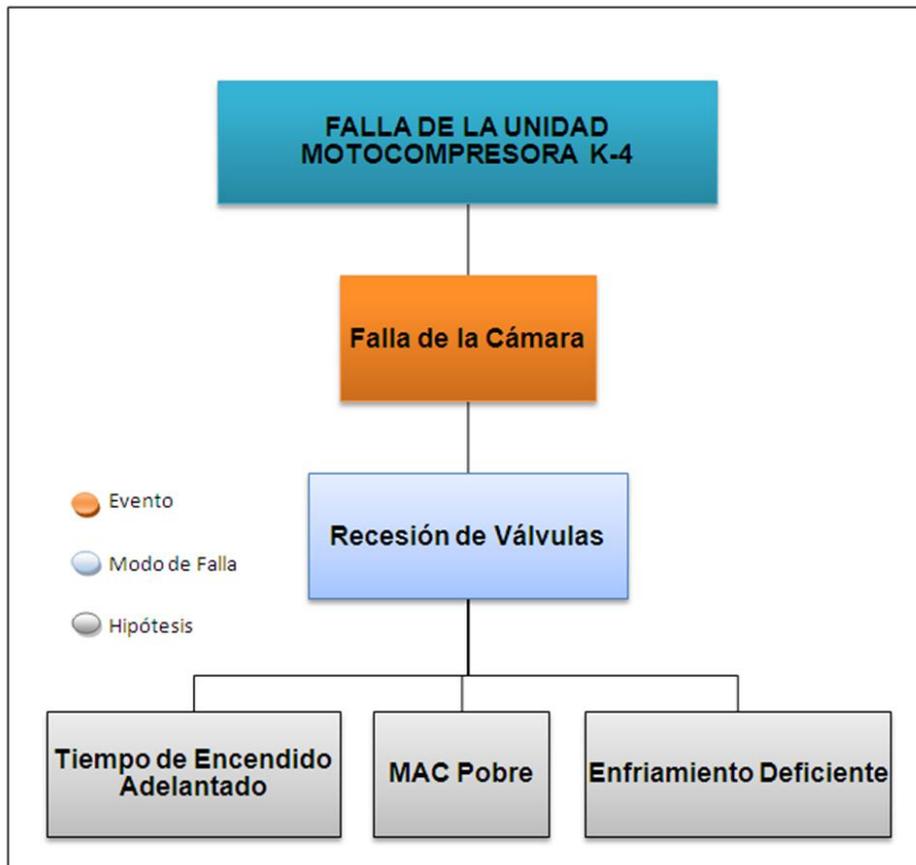


Figura 4.17 Árbol de fallas del análisis causa-raíz dividido en las hipótesis que podrían causar la Falla de la cámara

Fuente: El autor

A continuación se explican las hipótesis planteadas para el modo de falla de la Cámara:

- **Tiempo de Encendido Adelantado:** cuando el tiempo de encendido del motor de combustión interna está adelantado, las bujías producen la chispa dentro los cilindros de fuerza antes que los pistones completen la carrera de compresión, esto ocasiona un aumento brusco en la presión y temperatura de la Cámara,

provocando fuertes detonaciones que causan la recesión de las válvulas en sus asientos.

- **MAC Pobre:** cuando a los cilindros de fuerza entra una mezcla aire-combustible pobre proveniente del carburador, ésta contiene poco combustible, quedando el aire en exceso; de esta manera la velocidad de combustión disminuye, elevándose bruscamente la presión y temperatura de la Cámara cuando el pistón se encuentra en carrera de ascenso, esto da lugar a fuertes detonaciones que causan la recesión de las válvulas en sus asientos.
- **Enfriamiento Deficiente:** cuando existe un enfriamiento deficiente en las válvulas de las Cámaras, el agua que corre por el circuito principal de enfriamiento de la Unidad Motocompresora K-4 no logra disipar el calor que se produce en las válvulas durante la operación del motor de combustión interna, esto provoca que se acelere el desgaste en los cuellos de las mismas durante los ciclos de apertura y cierre, causando la recesión en sus asientos.

Seguidamente el ENT procedió a verificar las hipótesis planteadas, esto se llevó a cabo mediante la intervención de la Unidad, donde se desmontaron las Cámaras dispuestas en el bloque motor, observándose en todas ellas alta recesión en válvulas escape, además, se evidenció fractura entre las mismas. Según estos resultados, la verificación de las hipótesis arrojó que el Enfriamiento Deficientes el responsable de la recesión en las válvulas de la Cámara, se muestra la Cámara del cilindro de fuerza (C/F) 6L desarmada y en las figuras 4.18 y 4.19 se detallan las condiciones físicas encontradas en la misma Cámara luego de sufrir la falla.



Figura 4.18 Cámara C/F 6L de la unidad motocompresora K-4.
Fuente: El autor

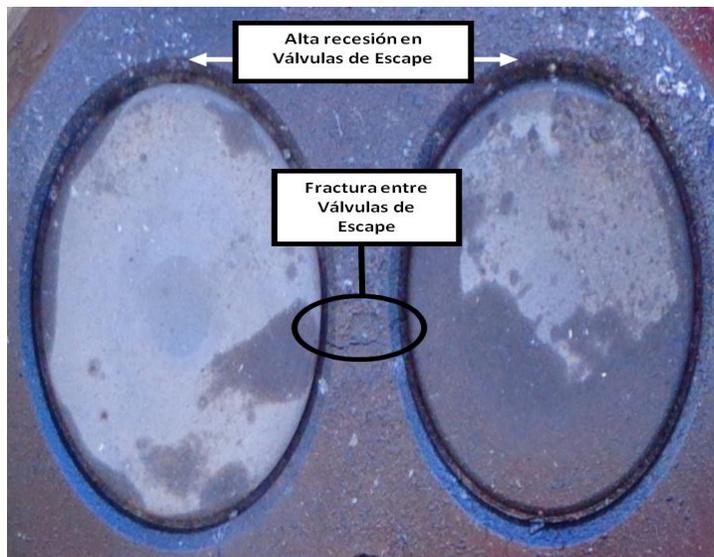


Figura 4.19 Condiciones físicas encontradas en la cámara
Fuente: El autor

Una vez verificada la hipótesis responsable del modo de falla más común que ha venido presentando la Cámara, el ENT determinó que el Enfriamiento Deficiente es provocado por depósitos minerales presentes en los pasajes de enfriamiento de las válvulas tal como se muestra en la figura 4.20, que impiden extraer el calor que en ellas se genera durante la operación de la Unidad, originando un sobrecalentamiento inmediato.

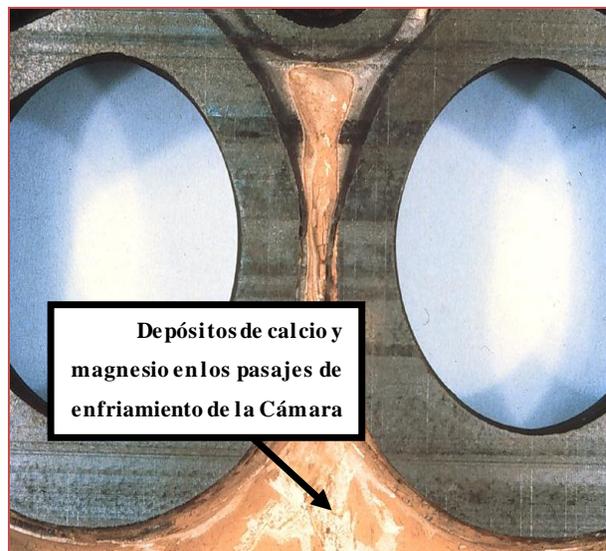


Figura 4.20. Depósitos minerales presentes en los pasajes de enfriamiento de las válvulas de la cámara

Fuente: El autor

La presencia de depósitos minerales en los pasajes de enfriamiento de las válvulas, constituye la raíz física que origina la Recesión en las Válvulas de la Cámara. A continuación el ENT estableció las raíces físicas, humanas y latentes que provocan la aparición de la falla crítica en la Cámara, continuando con la aplicación del Árbol de Fallas del Análisis Causa-Raíz, el cual es presentando en la figura 4.21.

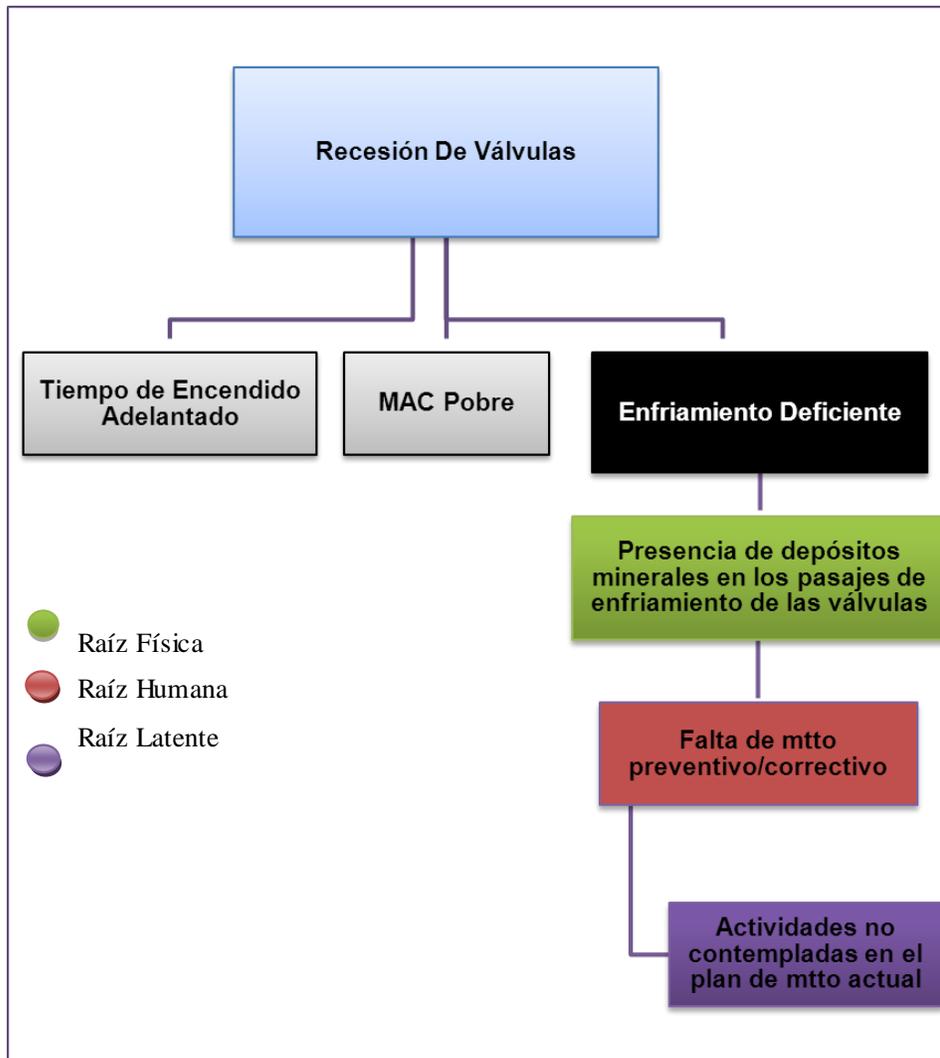


Figura 4.21 Árbol de fallas del análisis causa-raíz aplicado a la falla crítica de la cámara
Fuente: El autor

El ENT determinó que las causas-raíces de la falla crítica, son la ausencia de actividades en el plan de mantenimiento actual, el cual no cumple con las normas del fabricante que recomienda limpieza interna del subsistema de enfriamiento para

evitar los depósitos minerales. La selección de las raíces latentes como las causas-raíces que dan origen a la falla crítica de la Cámara se explica a continuación:

Los minerales que posee el agua cruda o natural, como: calcio y magnesio, se depositan en las áreas del motor donde ocurre la mayor transferencia de calor, como los pasajes de enfriamiento de las válvulas. La deposición de estos minerales se debe a la alta temperatura de operación característica de los motores a gas natural, que causa que precipiten y formen depósitos en los pasajes de enfriamiento de las válvulas. Esta situación provoca que las válvulas se sobrecalienten, especialmente las de escape, ocurra la recesión y la Cámara se fracture posteriormente.

En el mismo orden de ideas, desde el año 2000 hasta el año 2009 la Unidad Motocompresora K-4 estuvo operada por la empresa estadounidense EXTERRAN, la cual empleaba como refrigerante para la Unidad agua cruda, sin embargo esta empresa realizaba el “flushing” o lavado interno del subsistema de enfriamiento, como actividad preventiva para remover del circuito principal y auxiliar los depósitos o incrustaciones minerales, además cumplía con el “top endoverhaul” o mantenimiento mayor de Cámaras donde sus componentes eran reemplazados antes que fallaran. En el año 2010 la Unidad Motocompresora K-4 pasa a ser operada por PDVSA Gas Anaco, donde también se emplea agua cruda como refrigerante, mas no se contempla el lavado interno del subsistema de enfriamiento ni la sustitución de los componentes de las Cámaras dentro de la planificación general; ya que acarrea gastos excesivos de mantenimiento y paradas prolongadas del activo en la intervención preventiva, por ende, la Recesión de Válvulas se ha vuelto una falla constante.

En la figura 4.22 se presenta en el siguiente esquema general del Análisis Causa- Raíz realizado a la falla crítica de la Cámara que conforma el Subsistema Motor de la Unidad Motocompresora K-4.

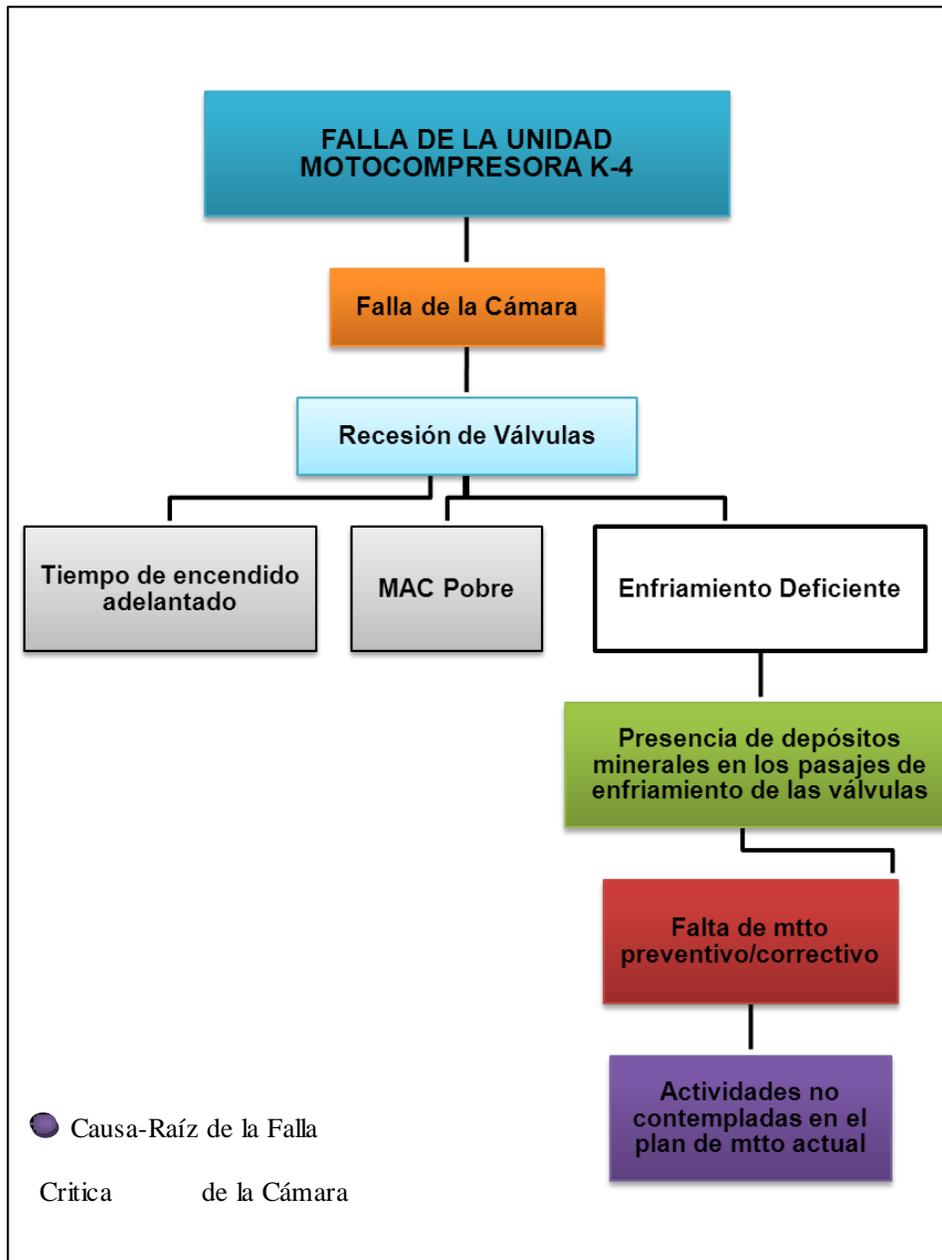


Figura 4.22 Análisis causa-raíz de la falla crítica en la cámara.
Fuente: El autor

4.5 Determinación de los parámetros de mantenimiento para los motores Waukesha L7042 GSI

La Confiabilidad y Disponibilidad de la Cámara estimados en el papel de Weibull, empleando el modelo grafico-paramétrico de la Distribución que lleva el mismo nombre, así como los TPEF y TPFS respectivamente, arrojaron resultados de 42.533 % para la Confiabilidad y 94.785% para la Disponibilidad. En lo que respecta a la Mantenibilidad, resultó un valor de 60.482% siguiendo el método grafico-analítico de la Distribución de Gumbell Tipo I. En la tabla 4.23 se puede observar de manera ordenada los valores definitivos para la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de la Cámara.

Tabla 4.23. Valores de confiabilidad y disponibilidad para la cámara

CÁMARA			
PARÁMETROS	ESTIMACIÓN		RESULTADOS
	Método Empleado	Descripción	
Confiabilidad	Grafico-Manual	Distribución de Weibull	43.33 %
Disponibilidad	Grafico-Manual	Distribución de Weibull	96.36 %
Mantenibilidad	Grafico-Manual	Distribución de Gumbell Tipo I.	60.482 %

Fuente: El autor

Es importante mencionar que PDVSA Gas Anaco emplea estándares operacionales para monitorear y evaluar el desempeño de cada uno de los equipos dentro de su contexto operacional. Estos estándares son: Confiabilidad 90 % y Disponibilidad 95%, los cuales son establecidos por el Departamento de Confiabilidad y deben ser alcanzados de modo de cumplir con las metas de producción de la empresa.

En base a lo antes planteado y según la tabla 4.23 se puede apreciar que la Confiabilidad de la Cámara no cumple con el estándar establecido por la empresa, con un valor de 43.33 %, significando que existe una probabilidad de casi 57 % de que ésta falle luego de transcurrir 894 horas operando, equivalente al tiempo promedio entre falla de la data, o que presente una (1) falla cada 37 días. En lo que respecta a la Disponibilidad, esta cumple con el estándar establecido por la empresa, con un valor igual a 96.36 %, esto quiere decir que la probabilidad de que la Cámara esté disponible para realizar la combustión de la MAC es 96.36 % para una frecuencia de falla de 894.055 horas y un promedio de tiempo fuera de servicio de 49.188 horas.

La Confiabilidad obtenida resultó ser menor que la Mantenibilidad y la Disponibilidad, el ENT determinó que esto se debe a que la Cámara falla constantemente, siendo ésta poco confiable, sin embargo dura fuera de servicio poco tiempo producto de la acción del personal de mantenimiento, que sustituye el equipo por otro nuevo, por consiguiente la Mantenibilidad resulta mayor y con un valor de 60.482% cumple con el estándar global empresarial, al estar por encima del valor de 50% establecido por el mantenimiento clase mundial. La Disponibilidad también resulta mayor; ya que la Cámara al estar por cortos periodos de tiempo fuera de servicio como fue antes mencionado, aumenta la probabilidad de que estén disponibles en la Unidad Motocompresora K-4 para ejecutar su función.

4.5.1 frecuencia de las actividades de mantenimiento a los equipos críticos de la unidad motocompresora K-4

Una vez obtenidos los valores para los parámetros de mantenimiento de la Cámara, se determinaron las frecuencias de aplicación para las actividades de mantenimiento a ser ejecutadas, empleando un tiempo que cumpla con el estándares de Confiabilidad y Disponibilidad establecidos por la empresa PDVSA Gas Anaco,

los cuales son 90 % y 95 % respectivamente. El tiempo empleado en la simulación representa el Tiempo de Intervención requerido para que el equipo en estudio opere correctamente y mantenga los niveles de Confiabilidad y Disponibilidad antes descritos.

Posteriormente, a partir del Tiempo de Intervención, las frecuencias de mantenimiento fueron ajustadas según el tipo de actividad a realizar y la realidad operacional de la máquina. Para esto se tomó en cuenta las recomendaciones del fabricante, y la experiencia del personal a cargo de la operación y mantenimiento del equipo; ya que éstos son los que conocen en profundidad su funcionamiento y desperfectos.

La frecuencia de ejecución de las actividades de mantenimiento para la Cámara, fue calculado en el papel, empleando la ecuación del modelo paramétrico de la Distribución de Weibull, en la cual se despejó el tiempo de estudio y se evaluó para una Confiabilidad de 90 %, tal como lo especifica la empresa PDVSA gas Anaco en sus estándares de operación, arrojando como resultado 200.407 horas u ocho (8) días aproximadamente para el Tiempo de Intervención de la Cámara. En la tabla 4.24 se muestra el resultado obtenido del Tiempo de Intervención para la Cámara.

Tabla 4.24. Resultado del tiempo de intervención de la cámara

CÁMARA			
CÁLCULO		FRECUENCIA	
Método Empleado	Descripción	Tiempo de Intervención	Frecuencia de Ejecución de la Tarea de Mantenimiento
Grafico- Manual	Ecuación de la Distribución de Weibull	200.407 horas	Semanal

Fuente: El autor

En base a esta situación, el ENT decidió emplear una Frecuencia Semanal de Intervención como el tiempo mínimo que debe transcurrir para ejecutar la tarea de mantenimiento en la Cámara, constituyéndose dicha frecuencia, como uno de los pilares fundamentales que sustentan la propuesta de mejoras a los planes de mantenimiento actuales de la Unidad Motocompresora K-4.

4.6 Plan de mantenimiento predictivo para los motores Waukesha L7042 GSI

Basándose en el análisis de los objetivos anteriores el ENT propuso planes de mantenimiento a la Unidad Motocompresora con mas fallas (K-4), partiendo de los resultados arrojados por el análisis cualitativo de las fallas, representado por el AMEF y el ACR, así como del análisis cuantitativo de las mismas, basado en los parámetros de mantenimiento: Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, aplicados a la Cámara del subsistema motor. El plan de mantenimiento se inició con la descripción de los planes de mantenimiento ejecutados actualmente a la Unidad Motocompresora de la Planta Santa II.

4.6.1 Descripción del plan de mantenimiento actual aplicado a la unidades motocompresoras

El Plan de Mantenimiento de la Unidad Motocompresora K-4, abarca el mantenimiento preventivo, predictivo y mayor del Motor de Combustión Interna, Compresor Reciprocante, entre otros, todo contemplado en un mismo documento. En la actualidad éstos contienen las actividades que deben ejecutarse, junto con sus respectivas frecuencias y el personal encargado de llevarlas a cabo. Sin embargo no especifican en forma detallada las actividades o tareas de mantenimiento que deben realizarse sobre los equipos, tampoco contemplan un procedimiento técnico para la ejecución de dichas tareas, ni las herramientas, instrumentos e insumos con los que se deben contar a la hora de llevarlas a cabo. Sumado a esto, las frecuencias de

mantenimiento estipuladas son fijas, es decir, no varían en función del tiempo de operación de la Unidad, lo cual ocasiona que se incremente el número de fallas, debido al desgaste en sus componentes.

La Gerencia de Operaciones en conjunto con la Gerencia de Mantenimiento son las encargadas de establecer y ejecutar la planificación, programación, y control de las actividades y frecuencias de mantenimiento, necesarias para mantener una operatividad segura de las Unidades Motocompresoras. El mantenimiento de ésta es gerenciado con la finalidad de obtener altos niveles de eficiencia, efectividad y eficacia en su contexto operacional, que permita establecer y definir los planes de mantenimiento, asegurando con ello la gestión y la oportuna intervención del activo.

Actualmente la filosofía empleada por las dos (2) Gerencias, establece que las tareas de mantenimiento de las Unidades Motocompresoras deben ejecutarse de acuerdo a ciertos niveles establecidos por PDVSA Gas Anaco, los cuales representan la manera en que son clasificadas las actividades, tomando como base la naturaleza del trabajo a realizar. Toda esta información es complementada a través de un Plan de Mantenimiento, donde se describe el activo, el contexto operacional y las tareas preventivas/correctivas asociadas a su mantenimiento. La clasificación de cada tarea de mantenimiento empieza por un primer nivel, denominado Nivel I, hasta un nivel mayor, denominado Nivel V. De acuerdo con la Norma PDVSA N° mm-01-01-04 titulada “Guía de Actividades Asociadas a los Niveles de Mantenimiento” Ella define las tareas que se realizan en las Unidades Motocompresoras de la siguiente manera:

- Nivel 1. En este nivel se describe el mantenimiento que involucra servicios básicos y las actividades de prevención, que no requieren desmontaje, apertura o parada de la Unidad Motocompresora, como por ejemplo: registro de parámetros operacionales en el panel, inspección visual del motor, compresor, radiador, niveles de aceite, agua, y limpieza exterior en general.

- Nivel 2. En este nivel se describen todas las actividades de inspección no intrusiva, pruebas, ensayos no destructivos, mantenimiento de elementos que no requieran la parada de la Unidad Motocompresora, como por ejemplo: análisis de vibraciones y de aceite lubricante, ajuste de la relación aire-gas combustible, chequeo de combustión, tiempo de ignición, que permitan establecer su condición operacional.
- Nivel 3. En este nivel se describen todas las actividades de inspección intrusiva, pruebas, ensayos no destructivos especializados, ensayos destructivos y mantenimiento preventivo para restituir las condiciones operacionales que requieran la parada de la Unidad Motocompresora, como por ejemplo: medición de deflexión en cigüeñales, toma de tolerancias en zapatas de crucetas y bielas compresoras, así como cambio de filtros de aceite, aire y gas combustible.
- Nivel 4. En este nivel se describen en general las actividades de restitución parcial de la Unidad Motocompresora, como por ejemplo: reemplazo de válvulas compresoras, cojinetes, arranque, árboles de levas y múltiple de escape, que prolonguen su vida útil e impliquen parada de la misma.
- Nivel 5. En este nivel se realizan todas aquellas actividades de restitución total de las condiciones originales de diseño, que impliquen parada de la Unidad Motocompresora, igualmente, reparaciones del Nivel 4 asignadas a este nivel por razones económicas o de oportunidad, como por ejemplo: el reemplazo de cigüeñales, grouting, y encamisado de cilindros de fuerza y compresores.

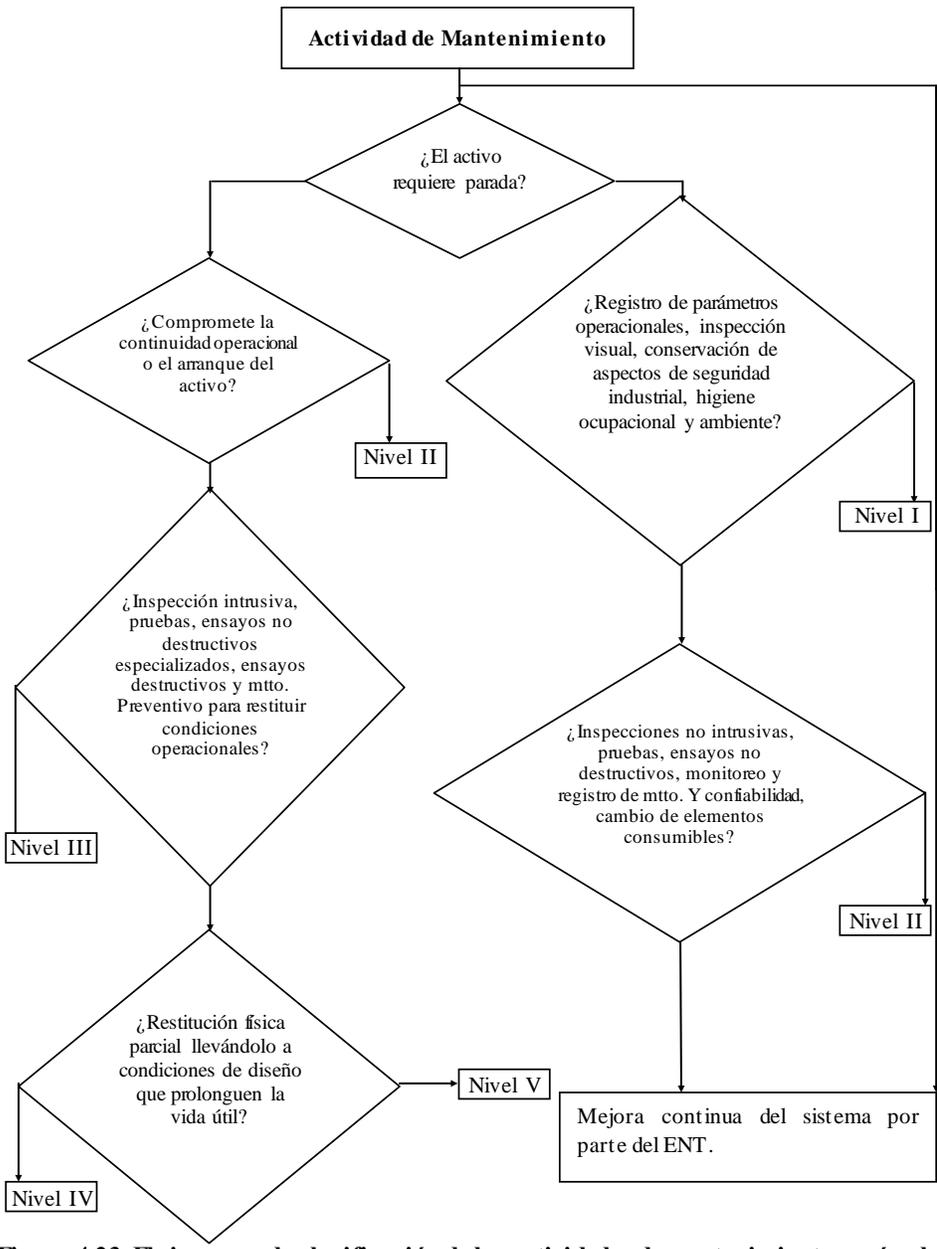
4.6.2 Determinación de actividades de mantenimiento de la cámara que conforma el subsistema motor de la unidad motocompresora K-4.

De acuerdo a los resultados de la estimación de los parámetros de mantenimiento a la Cámara, donde la Confiabilidad resultó 43.33 % estando por debajo del estándar exigido por PDVSA Gas Anaco de 90 %, y en función a las

carencias y deficiencias encontradas en los planes de mantenimiento aplicados actualmente en la Unidad Motocompresora K-4, se proponen actividades de mantenimiento para la Cámara.

El ENT procedió emplear el Flujograma de Clasificación de Actividades de Mantenimiento, donde se le asignó a cada tarea específica un nivel referencial, en base al estado operacional que debe tener el activo al momento de realizar la intervención preventiva y a la complejidad de cada actividad estipulada, esto a través de un algoritmo lógico donde se detallan las características del mantenimiento según el nivel establecido por la empresa PDVSA Gas Anaco.

En la figura 4.23 se muestra el flujograma debe seguirse para seleccionar el nivel de cada tarea.



Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm, Interlineado: sencillo

Con formato: Figuras, Izquierda

Con formato: Fuente: 11 pto

Figura 4.23. Flujograma de clasificación de las actividades de mantenimiento según el nivel establecido por PDVSA Gas Anaco.

Fuente: PDVSA Gas Anaco.

Una vez realizado el ACR al modo de falla que más impacta en los TFS del equipo crítico, haber obtenido los valores de los parámetros de mantenimiento de la Cámara, los cuales fueron: Confiabilidad 43.33 %, Mantenibilidad 60.482 % y Disponibilidad 96.36 %, aplicado el ALD a cada uno de los efectos de fallas arrojados por el AMEF y ejecutado el Flujograma de Clasificación de Actividades de Mantenimiento para las tareas determinadas, el ENT propuso incluir en la planificación actual de mantenimiento una serie de tareas o actividades preventivas necesarias para el plan de mantenimiento de la Unidad Motocompresora K-4, a partir de las nuevas condiciones operacionales que tendrá la Unidad con el nuevo equipo filtrante de desmineralizar del agua cruda, y en base a la realidad actual que atraviesa ésta, además se estableció el personal encargado de ejecutar dichas tareas y las frecuencias de aplicación para cada una de ellas.

Con formato: Español (Venezuela)

Con formato: Sangría: Primera línea: 1 cm, Espacio Antes: 0 pto, Después: 0 pto, Dividir palabras, Ajustar espacio entre texto latino y asiático, Ajustar espacio entre texto asiático y números

En cuanto a la frecuencia de mantenimiento para la ejecución de las actividades preventivas, se tomó la frecuencia calculada para mantener el estándar operacional de PDVSA Gas Anaco, el cual es de 90 % para la Confiabilidad. Esta frecuencia fue revisada y ajustada por el ENT a la realidad operacional de la Unidad Motocompresora K-4 y en función a sus horas de operación acumuladas, tomando en cuenta recomendaciones de los fabricantes, notas técnicas, juicios de expertos en el área y experiencia con equipos similares.

Con formato: Español (Venezuela)

Desde la tabla 4.25 hasta la 4.29 se presenta el formato para el mantenimiento planteado a las Cámaras, éste contiene el efecto para cada modo de falla obtenido, la consecuencia que genera dicho modo de falla, la tarea de mantenimiento propuesta, el tipo de tarea propuesta, el nivel de mantenimiento asociado a cada tarea, el personal técnico encargado de ejecutarla y la frecuencia específica con la cual debe cumplirse.

Con formato: Sangría: Primera línea: 1 cm, Dividir palabras, Ajustar espacio entre texto latino y asiático, Ajustar espacio entre texto asiático y números

Con formato: Español (Venezuela)

Tabla 4.25. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 1		
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6		
									
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia			
Los resortes no se comprimen y las válvulas dejan de actuar. Se origina golpeteo y altos niveles de vibraciones, también, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga.	Operacional	Chequear parámetros operacionales, ruidos y vibraciones inusuales.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Chequear fugas y niveles de aceite de motor.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Tomar temperatura en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	II	Operaciones	Diaria			
		Realizar análisis de aceite de motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Realizar análisis de vibraciones en motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Verificar lubricación y juego axial de balancines.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
		Verificar funcionamiento de taquetes hidráulicos.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
Sustituir bocinas de balancines.	Sustitución Cíclica.	IV	Mecánica	Cada 2.5 años					

Fuente: El autor

Tabla 4.26-A. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4.

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 2		
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6		
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia			
Las válvulas se adentran en sus asientos, los balancines dejan de trabajar y la cámara se fractura. Se produce golpeteo y altos niveles de vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de las MAC y el motor se apaga.	Operacional	Chequear parámetros operacionales, ruidos y vibraciones inusuales.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Tomar temperatura en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	II	Operaciones	Diaria			
		Realizar análisis de aceite de motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Realizar análisis de vibraciones en motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Realizar análisis de agua de motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Trimestral			
		Inspeccionar cámaras mediante técnica videoscópica.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
Medir compresión en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral					

Fuente: El autor

Tabla 4.26-B. Plan de Mantenimiento de las Cámaras de la Unidad Motocompresora K-4.

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 3		
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6		
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia			
Las válvulas se adentran en sus asientos, los balancines dejan de trabajar y la cámara se fractura. Se produce golpeteo y altos niveles de vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de las MAC y el motor se apaga.	Operacional	Medir recesión de válvulas.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
		Calibrar válvulas de admisión y escape.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
		Realizar lavado interno del circuito principal y auxiliar de enfriamiento	Basada en condición.	III	Mecánica	Anual			
		Sustituir válvulas, asientos y carcazas de cámaras.	Sustitución Cíclica.	IV	Mecánica	Cada 2.5 años			

Fuente: El autor

Tabla 4.27. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 4	
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6	
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia		
Los balancines, resortes y válvulas funcionan de manera inadecuada. Se generan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga.	Operacional	Chequear parámetros operacionales, ruidos y vibraciones inusuales.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria		
		Chequear fugas y niveles de aceite de motor.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria		
		Tomar temperatura en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	II	Operaciones	Diaria		
		Realizar análisis de aceite de motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual		
		Realizar análisis de vibraciones en motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual		
		Verificar funcionamiento de taquetes hidráulicos.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral		
		Inspeccionar levas mediante técnica videoscópica.	Basada en condición.	III	Mecánica	Semestral		
Sustituir varillas de empuje.	Sustitución Cíclica	IV	Mecánica	Cada 2.5 años				

Fuente: El autor

Tabla 4.28. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 5		
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6		
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia			
No se accionan los balancines y las válvulas no abren ni cierran. Se generan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara no puede realizar la combustión de la MAC y el motor se apaga.	Operacional	Chequear parámetros operacionales, ruidos y vibraciones inusuales.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Chequear fugas y niveles de aceite de motor.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Tomar temperatura en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	II	Operaciones	Diaria			
		Realizar análisis de aceite de motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Realizar análisis de vibraciones en motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Verificar funcionamiento de taquetes hidráulicos.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
		Sustituir taquetes hidráulicos.	Sustitución Cíclica	IV	Mecánica	Cada 2.5 años			

Fuente: El autor

Tabla 4.29. Plan de mantenimiento de las cámaras de la unidad motocompresora K-4

	Unidad: K-4		Subsistema: Motor		Equipo: Cámara		Hoja: 6		
	Realizado Por:		Revisado Por:		Fecha: 11/01/2014		De: 6		
Efecto	Consecuencia de la Falla	Tarea	Tipo de Tarea	Nivel	Ejecutor	Frecuencia			
Las válvulas no cierran, se queman y ocurre la pre-ignición de la MAC. Se originan fuertes ruidos y vibraciones, alta temperatura de aceite de motor y de agua principal. La cámara realiza la combustión de la MAC por encima de 385 lpc y 1126 °F causando que el motor no mantenga sus rpm.	Operacional	Chequear parámetros operacionales, ruidos y vibraciones inusuales.	Basada en condición.	I	Operaciones	Diaria			
		Tomar temperatura en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	II	Operaciones	Diaria			
		Realizar análisis de vibraciones en motor.	Basada en condición.	II	Ingeniería	Mensual			
		Medir compresión en cilindros de fuerza.	Basada en condición.	III	Mecánica	Trimestral			
		Sustituir resortes de válvulas.	Sustitución Cíclica.	IV	Mecánica	Cada 2.5 años			

Fuente: El autor

Ya realizada las actividades para el plan de mantenimiento de la Unidad Motocompresora K-4, se generaron sesenta y siete (39) actividades de mantenimiento para las Cámaras, treinta y cuatro de éstas (34) resultaron ser tareas basadas en condición y cinco (5) resultaron ser de sustitución cíclica, adicionalmente, quince (15) tareas, que representan el 36% de las tareas totales resultaron ser de nivel II en la jerarquía de mantenimiento establecida por PDVSA Gas Anaco, trece (13) tareas, que representan el 33% de las tareas totales tuvieron al área de operaciones como ejecutor, así como, el mismo número de tareas deberán cumplirse con una frecuencia diaria.

En las tablas 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 se presentan detalladamente los resultados arrojados por la propuesta de mejoras a los planes de mantenimiento de la Unidad Motocompresora K-4, de acuerdo a las tareas por tipo, nivel, ejecutor y frecuencia de aplicación respectivamente, adicionalmente, en las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28 se muestran las distribuciones porcentuales de todos estos resultados.

Tabla 4.30. Cantidad de tareas propuestas por tipo para las cámaras

Equipo	TIPO DE TAREA					
	Tarea a condición	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Tarea de sustitución cíclica	Tarea de búsqueda de falla	Ningún mantenimiento preventivo	Rediseño
Cámara	34	0	5	0	0	0

Fuente: El autor

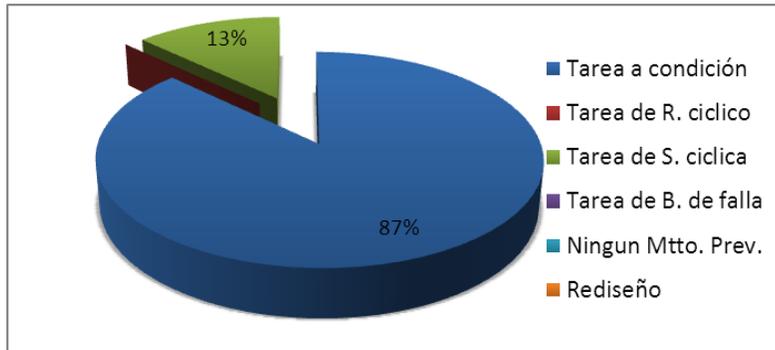


Figura 4.24. Distribución porcentual de las tareas propuestas por tipo para las cámaras
Fuente: El autor

Tabla 4.31. Cantidad de tareas propuestas por nivel para las cámaras

Nivel	Cantidad de Tareas Propuestas
I	8
II	15
III	11
IV	5
V	0

Fuente: El autor

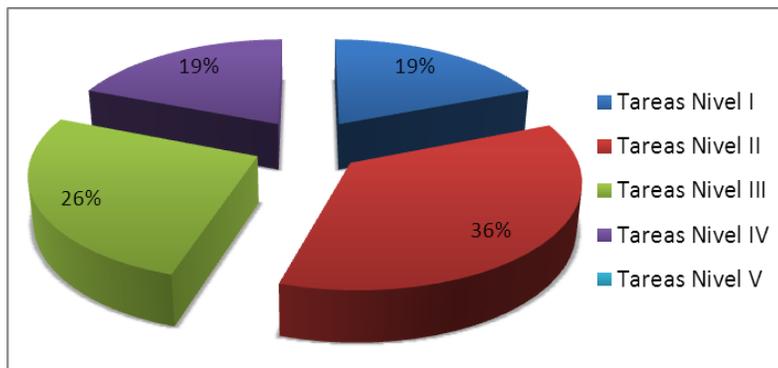


Figura 4.25. Distribución porcentual de las tareas propuestas por nivel para las cámaras
Fuente: El autor

Tabla 4.32. Cantidad de tareas propuestas por ejecutor para las cámaras

Ejecutor	Cantidad de Tareas Propuestas
Operaciones	13
Mecánica	16
Instrumentación	0
Ingeniería	10

Fuente: El autor

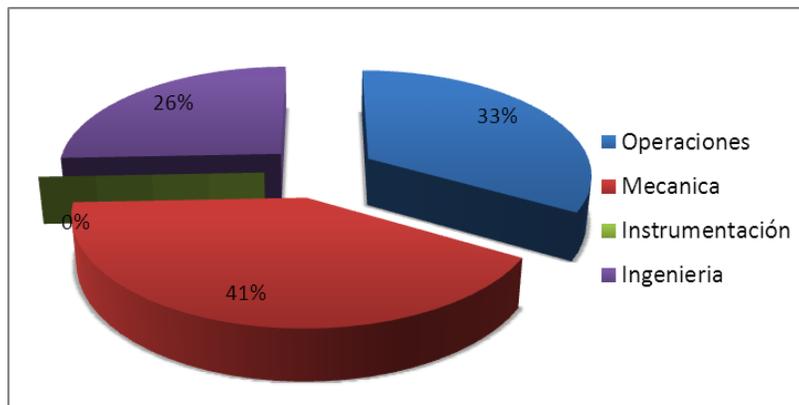


Figura 4.26. Distribución porcentual de las tareas propuestas por ejecutor para las cámaras

Fuente: El autor

Tabla 4.33. Cantidad de tareas propuestas según la frecuencia de ejecución para las cámaras

Frecuencia de Ejecución	Cantidad de Tareas Propuestas
Diaria	13
Mensual	9
Trimestral	10
Semestral	1
Anual	1
Cada 2.5 años	5

Fuente: El autor

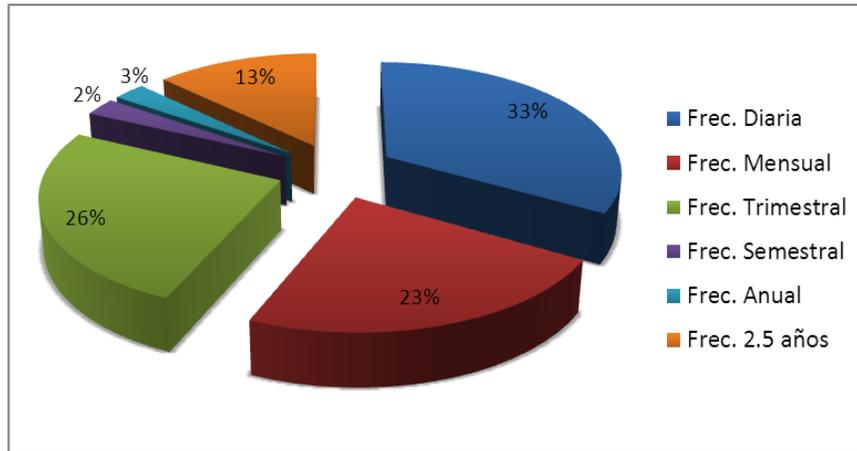


Figura 4.27. Distribución porcentual de las tareas propuestas por frecuencia de ejecución para las cámaras

Fuente: El autor

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El equipo natural de trabajo, basándose en manuales del fabricante y experiencias definieron el contexto operacional de los motocompresores Waukesha L 7042 GSI, ubicados en la planta compresora santa rosa II 2000, esto permitió conocer el proceso de compresión del gas natural, los equipos y sus componentes así como su funcionamiento. Para ello se dividió el proceso en cuatro (4) subsistemas y veintiún (21) componentes. La información técnica sirvió de base para la realización de la matriz de impacto- esfuerzo, la cual dio como resultado que el subsistema motor posee la mayor jerarquización con una ponderación de dos (02) puntos.
2. El análisis de criticidad por el método de PDVSA realizado a los siete motores, arrojó como resultado que el motor de la unidad K4 posee el más alto nivel de criticidad con una ponderación final de 3.005,625 puntos, ubicándose este en niveles de alertas, próximo a estado crítico.
3. El análisis de criticidad con el método de Diógenes Suarez realizado a los componentes del motor (Arranque, Electroválvula, Válvula de Gas Combustible, Carburador, Gobernador, Generador, Cámara y Turbo), determinó que el mas crítico de los subsistemas del motor fue la cámara, con 76.5 % de probabilidad de fallas, ubicándola en un nivel crítico.
4. El Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), arrojó que la Cámara realiza una (1) sola Función Principal y posee tres (3) Fallas Funcionales y

nueve (9) modos de Falla. Este método evalúa las raíces físicas, humanas y latentes del modo de falla más común del componente en estudio la cual resultó ser la Recesión de Válvulas, donde se consideró una (1) sola hipótesis posible: el Enfriamiento deficiente, resultó como causas-raíces de la falla.

5. La Mantenibilidad a la Cámara se estimó en forma manual empleando el método gráfico de la Distribución de Gumbell Tipo I, resultando un valor de 60.482 %, lo cual indica que para un tiempo igual al TPFS de la data (49.188 horas), existe una probabilidad de 60.482 % que el personal de mantenimiento logre reparar o sustituir la Cámara.
6. El flujograma de clasificación de las actividades de mantenimiento según el nivel establecido por PDVSA Gas Anaco, permitió clasificar treinta y nueve (39) actividades de mantenimiento como tareas basadas en condición y cinco (5) actividades de mantenimiento como tareas de sustitución cíclica.

5.2. Recomendaciones

- En base al resultado obtenido por la matriz impacto-esfuerzo, es necesario direccionar los recursos tanto de operaciones (acciones proactivas) como de los mantenedores con inspecciones más frecuentes de la condición de sus variables operacionales (Presión de aceite, temperaturas, niveles de vibración, entre otros)
- Se debe considerar una estrategia en particular para el caso del motor de la unidad k-4 por su alto nivel de criticidad elevado índice de fallas, basada en un seguimiento estricto de su monitoreo por condición y si fuera posible disminuir la frecuencia de inspecciones preventivas realizadas actualmente (trimestralmente).
- Incluir dentro de las acciones preventivas programadas la revisión de los componentes de la cámara, tales como válvulas asientos y resorte. Además de un seguimiento o monitoreo por ultra sonido para evaluar su comportamiento de forma preventiva.

- Redirigir los esfuerzos y estrategias sugeridas por el ENT hacia las causas raíces de las fallas, en este caso el enfriamiento deficiente, para evitar la posible deterioro y continuas fallas, incrementando las frecuencias recomendadas de mantenimiento preventivos y supervisión de su cumplimiento, con el fin de alargar la vida útil de los equipos. esto ayudaría en las actividades especializadas dirigidas a mitigar el modo y efecto de falla que originan la recepción de válvulas.
- Realizar inventarios de los repuestos, materiales y herramientas disponibles para los equipos que conforman la Unidad Motocompresora K-4 en especial los relacionados con las cámaras, implementar algún programa de computación para llevar un control detallado de los materiales, repuestos y herramientas, de manera de evitar retrasos al momento de reparar una falla cuando ésta ocurre relacionado con la entrega del repuesto o componente..
- Elaborar un plan de mantenimiento según el flujograma de Clasificación de las actividades de mantenimiento, basado en los parámetros de mantenimiento para los motores Waukesha L 7042 GSI y en el monitoreo de condiciones de las unidades motocopresoras, el cual pudiera ser aplicado a otras unidades similares de PDVSA con el fin de mejorar su desempeño, que junto a la formación del personal de operaciones y mantenimiento, garanticen las estrategias necesarias para abordar la criticidad presentada por el Motor K-4 , con el fin de garantizar la operación de la Unidad en estudio.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Confima & Consultores. (2007). Herramientas Técnicas para Mejorar la Confiabilidad. Primera Edición. Puerto La Cruz. Venezuela.

[2] Confima & Consultores. (2007). Parámetros de Mantenimiento (Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad). Primera Edición. Puerto La Cruz. Venezuela.

[3] Confima & Consultores. (2010). Planificación y Control de una Parada de Planta. Primera Edición. Puerto La Cruz. Venezuela.

[4] Dresser Waukesha. (1998). “Manual de Operación y Servicio, Motores Waukesha Serie VHP para Gas y Diesel”. Segunda Edición. Wisconsin. Estado Unidos de América.

[5] Fibertel, Juan. (2007) RCM - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. [Artículo publicado en la Web], portal Gestipolis. RCM-Confiabilidad Disponible en <http://www.gestipolis.com/rcm-mantenimiento-centrado-en-confiabilidad>[Consulta: 2014, Noviembre 6].

[6] Mosquera, L. (2008). Aplicación de Metodologías de Confiabilidad Integral para Solución de Problemas en el Mejorador de Crudos de PETROPIAR. El Tigre – Estado Anzoátegui. Trabajo de Especialización de Ingeniería Mecánica de Plantas de Procesos. Universidad Simón Bolívar. Caracas. Venezuela.

[7] Mundarain, C. (2009). Diseño de un Programa de Mantenimiento Basado en Condición, Enfocado A la Mejora de la Efectividad de los Activos Rotativos. Caso:

Planta Supermetanol C.A., Estado Anzoátegui. Trabajo de grado. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad de oriente. Barcelona. Venezuela.

[8] Norma Venezolana COVENIN 3049-93. (1993). Mantenimiento Definiciones. Publicada en su reunión N° 124 de fecha 01 de diciembre de 1993.

[9] PDVSA N° MM-01-01-01. (2011) (Vol. 1-1). “Definiciones de Mantenimiento y Confiabilidad”. Venezuela

[10]PDVSA N° MM-01-01-02. (2013) (Vol. 1-1). “Indicadores d Gestión del Proceso de Mantenimiento”. Venezuela.

[11]Prof. Suárez D. y Prof. Bravo D. (Comp.).(2008). Guía de Mantenimiento Mecánico (Código 061-5192). Puerto la Cruz. UDO. Venezuela.

[12]Suárez, Diógenes. (Comp.). (2007). Clasificación de Equipos en Función de su Criticidad. Introducción para el estudio de equipos. Puerto la Cruz: Confima & Consultores. Venezuela.

[13]Suárez, Diógenes. (Comp.). (2008). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC). Puerto la Cruz. Venezuela.

[14] Stronconi, D. Y Tamoy, J. (2010). Plan de Mantenimiento Correctivo – Preventivo de los Transformadores de Distribución en la Empresa ELEBOL C.A, Ciudad Bolívar – Estado Bolívar. Trabajo de Grado. Dpto. de Ingeniería Industrial. Universidad de Oriente. Ciudad bolívar. Venezuela.

[15] Urbay, G. (2010). Elaboración de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para Equipos Críticos. Caso: Línea de Producción de la Planta

Procesadora de Maíz para Harina Precocida CVA. Chaguaramas estado Guárico.
Trabajo de Grado. Dpto. Ing. Mecánica. Universidad de Oriente. Barcelona.
Venezuela.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN LOS PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO PARA LOS MOTORES WAUKESHA L 7042 GSI DE LA PLANTA COMPRESORA SANTA ROSA II 2000 ANACO ESTADO ANZOÁTEGUI”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Sánchez R., Robert J.	CVLAC: 20.196.078 E MAIL: SRRJ@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

MCC

Mantenimiento,

AMEF

Motores Waukesha

Planta compresora

PDVSA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería	Ingeniería Industrial

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo tiene como objetivo la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en diferentes parámetros asociados a los motores Waukesha L 7042 GSI de la planta compresora Santa Rosa II 2000 Anaco estado Anzoátegui. Para el cumplimiento de tal objetivo, se realizó un levantamiento de los procesos productivos de la planta, recopilación de información técnica de los equipos incluidos en el estudio, para establecer los niveles de severidad, la frecuencia de monitoreo de cada equipo y luego recomendar acciones que pudiera llevarse al resto de las empresas PDVSA GAS Anaco en sus distintas áreas donde tengan equipos similares, esto con el fin de fortalecer las acciones que actualmente lleva la empresa para mantener los equipos operativos.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Ing. Ledezma, Melchor			X		
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Ing. Gómez, Marcos				X	
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Ing. García, Jaime					X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Esp. Alcántara, José					X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2015		
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Diseño de un plan de mantenimiento.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I
J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Dpto. Mantenimiento/Planta Compresora Santa Rosa II **(Opcional)**

TEMPORAL: Seis meses **(Opcional)**

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Industrial

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Ingeniería Industrial

INSTITUCIÓN(ES) QUE GARANTIZA(N) EL TÍTULO O GRADO:

Universidad de Oriente / Extensión Región Centro Sur Anaco

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CU N° 0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda "SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009".

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
SISTEMA DE BIBLIOTECA
RECIBIDO POR [Firma]
FECHA 05/8/09 HORA 5:30

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

[Firma]
JUAN A. BOLAÑOS CUMPEL
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Telemática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YOC/marja

Apartado Correos 094 / Telf: 4008042 - 4008044 / 8008045 Telefax: 4008043 / Cumaná - Venezuela

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de trabajos de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.

AUTOR

Sánchez R., Robert J.I

AUTOR

AUTOR

Ing. Ledezma, Melchor
TUTOR

Ing. García, Jaime
JURADO

Esp. Alcántara, José
JURADO

Ing. Valderrama, Rita
POR LA COMISIÓN DE TESIS