

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO
OPERACIONAL BASADA EN INDICADORES DE EFECTIVIDAD
DEL MOTOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE”**

**CASO: Motor 200-MK-2 de la Planta Super Octanos C.A., Jose – Edo –
Anzoátegui.**

Realizado por:

José Alejandro Tayupo Caguana

CI: V-15.705.594

Trabajo de Grado Presentado ante la Universidad de Oriente Como Requisito Parcial para

Optar al Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Barcelona, Noviembre de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO
OPERACIONAL BASADA EN INDICADORES DE EFECTIVIDAD
DEL MOTOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE”**

**CASO: Motor 200-MK-2 de la Planta Super Octanos C.A., Jose – Edo –
Anzoátegui**

Revisado y Aprobado por:

Prof. Delia Villarroel
Asesor Académico

Ing. José F. García M.
Asesor Industrial

Barcelona, Noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“EVALUACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO
OPERACIONAL BASADA EN INDICADORES DE EFECTIVIDAD
DEL MOTOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE”**

**CASO: Motor 200-MK-2 de la Planta Super Octanos C.A., Jose – Edo –
Anzoátegui**

JURADO

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

APROBADO

Prof. Delia Villarroel
Asesor Académico

Prof. Edgar Rodríguez.
Jurado Principal

Prof. Luís Griffith.
Jurado Principal

Barcelona, Noviembre de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo N° 41 del Reglamento de Trabajos de Grado “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario”

AGRADECIMIENTOS

Definitivamente, gracias a dios JEHOVA, por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y poder compartirlo con mi familia, por llenar mi vida de dicha y bendiciones. GRACIAS DIOS.

A mi madre Isbelia Caguana, por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. Gracias por guiarme sobre el camino de la educación. Madre, serás siempre mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensa. Tu esfuerzo, se convirtió en tu triunfo y el mío. TE AMO MADRE.

A mi padre José Tayupo, por nunca dejarme desviar del camino, por ser el hombre más sacrificado que conozco, por darme la estabilidad emocional, económica, sentimental; para poder llegar hasta este logro, que definitivamente no hubiese podido ser realidad sin él. TE AMO PADRE.

A mis hermanos, José Luís, José Miguel y Yosbelis Alejandra, por estar ahí cuando más los necesitaba, por hacerme reír en todo momento, por su comprensión, a ustedes mis hermanos les dedico este logro.

A mi tía Milagros, por hacer de mi hada madrina. TE QUIERO MI TIA NENA.

A mi abuela Eustoquia, una mujer trabajadora, por todo tu amor y cariño, por encomendarme siempre con dios para que saliera adelante.

A la profesora Delia Villarroel por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección, su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable. Muchas Gracias PROFESORA.

Al Ing. José García. Por el apoyo y orientación que me brindo para realizar este trabajo.

A todos mis amigos pasados y presentes, por estar siempre conmigo apoyándome en todas las circunstancias posibles, también son parte de esta alegría, LOS RECUERDO.

A mi abuela María que dios la tenga en su gloria, te recuerdo y te extraño.

A mis abuelos Alejandro, Beltrán y Héctor, a mis tíos, María, Delia, Ramón Tayupo, Ramón Caguana, Marisol, Franklin, por apoyarme en todo momento a lograr mis metas.

A la señora Malena, al señor Héctor y a su hija Sofía, por ser el eslabón entre el mundo laboral y yo, nunca olvidare su ayuda. MUCHAS GRACIAS.

Al personal de Super Octanos, C.A., en especial a los del tráiler de Confiabilidad por su cálida bienvenida, por su ayuda, por compartir sus conocimientos, por interesarse en mi trabajo. GRACIAS.

José Alejandro Tayupo Caguana

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Isbelia Caguana y José Tayupo gracias por su apoyo, esfuerzo y paciencia durante estos años. A mis hermanos José Luís, José Miguel y Yosbelis Alejandra como una prueba de que los sueños se pueden lograr y como impulso para la realización de todas sus metas. A mis amigos y compañeros que hicieron más fácil este difícil trayecto.

A ustedes con mucho cariño

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo principal, realizar una Evaluación Técnica del Comportamiento Operacional basada en Indicadores de Efectividad del Motor de un Sistema de Compresión de Aire de la planta Super Octanos C.A., Jose-Edo- Anzoátegui, con el propósito de implementar actividades de mantenimiento que mejoren los Indicadores de Efectividad, y por ende la gestión del mantenimiento. El primer paso para la ejecución de esta evaluación fue la realización de un diagnóstico de la situación operativa, para conocer cómo debe trabajar y cómo esta trabajando actualmente el motor. A continuación, se realizó un Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) donde se establecieron las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y efectos de las fallas del motor 200-MK-2, seguidamente se utilizó la herramienta del Análisis de Pareto para determinar cual de todas las fallas impacta de mayor manera en el tiempo fuera de servicio del motor. Luego se procedió con el Análisis Causa Raíz (ACR), aplicando la técnica del árbol de falla, que permitió la identificación de las raíces físicas, humanas y latentes de la falla que más impacta en el tiempo fuera de servicio. Luego se calcularon los indicadores de efectividad que dieron cuenta mediante probabilidades estadísticas del estado de vida útil del motor 200-MK-2. Para finalizar se realizó la evaluación del índice relativo de confiabilidad mediante el análisis de cinco factores, estos fueron: inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo, esto permitió conocer el estado operativo actual del equipo. Además, mediante las pruebas de vibraciones y temperatura, se comprobó que cada vez que ocurren cambios bruscos de temperatura en la succión del compresor se generan picos de vibración en la posición vertical del cojinete lado libre del motor 200-MK-2, lo que posiblemente a la larga produzca la falla del anillo de cortocircuito. La implementación de acciones que mejoren los indicadores de efectividad, permitirá

garantizar la continuidad operativa mejorando los niveles de rentabilidad del sistema de compresión de aire.

ÍNDICE

RESOLUCIÓN	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vii
RESUMEN.....	viii
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
INDICE DE FIGURAS.....	xix
ABREVIACIONES Y TÉRMINOS	xxii
INTRODUCCIÓN	xxiii
CAPÍTULO I.....	26
EL PROBLEMA.....	26
1.1. La empresa	26
1.1.1. Reseña Histórica de la Empresa	26
1.1.2. Misión y Visión	28
1.1.3. Objetivos de la Empresa.....	29
1.1.4. Política de Calidad de la Empresa.....	29
1.2. Planteamiento del problema	31
1.3. Objetivos de la investigación	33
1.3.1. Objetivo General	33
1.3.2. Objetivos Específicos	34
1.4. Justificación e importancia de la investigación.....	34
CAPÍTULO II	36
MARCO TEÓRICO.....	36
2.1. Antecedentes de la investigación	36
2.2. Fundamentos teóricos.....	38
2.2.1. Conceptos y Principios Básicos.....	38

2.2.2. Equipo Natural de Trabajo (ENT).....	41
2.2.3. Análisis de Modos y Efectos de Falla (A.M.E.F.).....	42
2.2.4. Diagrama de Pareto	43
2.2.5. Análisis de Árbol de Fallas.....	45
2.2.6. Análisis Causa Raíz (A.C.R.)	45
2.2.7. Distribuciones de Probabilidad.....	47
2.2.7.1. Distribuciones No Paramétricas.....	47
2.2.7.2. Distribuciones Paramétricas	48
2.2.8. Indicadores de Efectividad en el Mantenimiento	52
2.2.9. Índice Relativo de Confiabilidad.....	57
2.2.9.1. Inspección Visual.....	57
2.2.9.2. Pruebas y Mediciones.....	58
2.2.9.3. Edad del equipo	59
2.2.9.4. Medio ambiente	60
2.2.9.5. Carga de trabajo.....	60
2.2.10. Evaluación Técnica.....	60
2.2.11. Valor Presente Neto (VPN).....	61
2.2.12. Análisis del Costo del Ciclo de Vida.....	63
2.2.13. Visión General de los Procesos de la Planta Super Octanos C.A.....	65
2.2.14. Sistema de Compresión de Aire	68
2.2.15. Compresor Centrífugo.....	68
2.3. Nociones basicas de los motores eléctricos.....	70
2.3.1. Motor Eléctrico.....	70
2.3.2. Clasificación de los Motores Eléctricos	71
CAPÍTULO III.....	75
MARCO METODOLÓGICO.....	75
3.1. Tipo de investigación	75
3.2. Técnicas de investigación y análisis.....	76
3.2.1. Observación Directa o Inspección Visual	76

3.2.2. Recolección de Data Operacional y de Diseño	77
3.2.3. Entrevistas informales al Personal.....	77
3.2.4. El Diagnóstico	77
3.2.5. Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF).....	78
3.2.6. Principio de Pareto	78
3.2.7. Análisis Causa Raíz.....	78
3.2.8. Estimación de los Indicadores de Efectividad.....	78
3.2.9. Estimación del Índice Relativo de Confiabilidad.....	78
3.2.10. Manejo de Programas Computación	79
3.3. Población y muestra	79
3.4. Etapas de la investigación	80
3.4.1. Revisión bibliografía:	80
3.4.2. Diagnóstico del motor 200-MK-2 en función al contexto operacional:	80
3.4.3. Análisis de Modos y Efectos de Fallas del motor (AMEF) del motor 200- MK-2:	80
3.4.4. Análisis Causa-Raíz de la falla recurrente en el motor para la determinación del origen de la falla	81
3.4.5. Estimación de los Indicadores de Efectividad:.....	82
3.4.6. Evaluación técnica del comportamiento operacional del motor 200-MK-282	
3.4.7. Propuesta de acciones que mejoren el comportamiento operacional del motor 200-MK-2:	82
3.4.8. Redacción y presentación del trabajo de grado:	83
CAPÍTULO IV	84
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	84
4.1. Contexto operacional del motor 200-mk-2 del sistema de compresión de aire de regeneración de la planta super octanos C.A.....	84
4.1.1. Conformación Del Equipo Natural De Trabajo (ENT)	86
4.1.2. Diagnóstico de la Situación Actual del Motor 200-MK-2 del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración.	87

4.1.2.1. Sub-Sistema de Lubricación	91
4.1.2.2. Sub-Sistema de Enfriamiento	98
4.1.2.3. Sub-Sistema Eléctrico de Arranque.....	103
4.1.3. Resumen de la Situación Actual del Motor 200-MK-2 en función al Contexto Operacional.....	108
4.2. Analisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del motor 200-MK-2.	111
4.3. Análisis causa raíz de la falla en el equipo crítico del motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración.	117
4.3.1. Determinación de las Fallas Críticas del Motor 200-MK-2 aplicando el Principio de Pareto	117
4.3.2. Árbol de Falla de la Falla en el Anillo de Cortocircuito del Motor 200-MK-2 del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración.....	119
4.4. Indicadores de efectividad del motor 200-MK-2	128
4.4.1. Confiabilidad y Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF).....	129
4.4.2. Mantenibilidad y Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS).....	136
4.4.3. Disponibilidad Operacional (Do)	141
4.4.4. Estimación del Índice Relativo de Confiabilidad del Motor 200-MK-2.	145
4.4.4.1. Inspección Visual al motor 200-MK-2	146
4.4.4.2. Pruebas y Mediciones de Funcionamiento	148
4.4.4.3. Edad del Equipo.....	159
4.4.4.4. Medio Ambiente	160
4.4.4.5. Carga de Trabajo.....	161
4.4.5. Comparación de la Confiabilidad obtenida por el Método Estadístico de la Distribución de Weibull y por el Índice Relativo de Confiabilidad.....	163
4.5. Evaluación técnica del comportamiento operacional del motor 200-MK-2. .	164
4.5.1. Propuesta de Reemplazo del Motor 200-MK-2 por una Turbina a Gas Basada en el Análisis del Costo del Ciclo de Vida.....	168
4.5.1.1. Análisis de Reemplazo	169
4.5.1.2. Simulación con Crystal Ball®	174

4.6. Propuesta de acciones que mejoren el comportamiento operacional del motor 200-MK-2.....	177
4.6.1. Propuesta de Mejoras en el Procedimiento de Desarmado y Emsamblaje del Anillo de Cortocircuito del Motor 200-MK-2.....	178
4.6.2. Propuestas de Mejoras a los Planes de Mantenimiento del Motor 200-MK-2.....	180
CAPÍTULO V.....	188
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	188
5.1. Conclusiones.....	188
5.2. Recomendaciones.....	190
BIBLIOGRAFÍA.....	192
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	194

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Formato para el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF)	81
Tabla 4. 1. Equipos principales del sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200 con su designación.	84
Tabla 4. 2. Equipo natural de trabajo para el estudio del motor 200-MK-2.	87
Tabla 4. 3. Especificaciones técnicas del motor eléctrico 200-MK-2.....	88
Tabla 4. 4. Equipos a estudiar dentro de cada subsistema que conforma el motor 200-MK-2.	90
Tabla 4. 5. Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de lubricante... ..	92
Tabla 4. 6. Parámetros operacionales y de diseño de los equipos de la unidad de bombeo de aceite.....	93
Tabla 4. 7. Especificaciones técnicas de los enfriadores del subsistema de lubricación.	94
Tabla 4. 8. Especificaciones técnicas de los filtros de aceite tipo Duplex del sub-sistema de lubricación.	95
Tabla 4. 9. Especificaciones técnicas de los cojinetes del motor 200-MK-2.....	97
Tabla 4. 10. Parámetros operacionales y de diseño de los equipos del sub-sistema de enfriamiento.	100
Tabla 4. 11. Parámetros operacionales y de diseño de la turbina a vapor tipo Curtis del sub-sistema de enfriamiento.....	100
Tabla 4. 12. Parámetros operacionales y de diseño del sub-sistema de enfriamiento por agua del motor 200-MK-2.	102
Tabla 4. 13. Especificaciones técnicas del motor eléctrico y caja reductora del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.....	104
Tabla 4. 14. Especificaciones técnicas de las escobillas y anillos colectores del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.....	106

Tabla 4. 15. Especificaciones técnicas de los contactos planos y cilíndricos del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.....	107
Tabla 4. 16. Parámetros de diseño y operacional del motor 200-MK-2.	110
Tabla 4. 17. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema de lubricación del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE SuperOctanos C.A.....	113
Tabla 4. 18. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema de enfriamiento del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE Super Octanos C.A.....	115
Tabla 4. 19. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE Super Octanos C.A.....	116
Tabla 4. 20. Jerarquización de las fallas.	118
Tabla 4. 21. Data historica del motor 200-MK-2.....	130
Tabla 4. 22. Resultados de la Distribución de Weibull por Crystall Ball ® 11.0.	134
Tabla 4. 23. Tabla de Resultados que muestra la Frecuencia Acumulada de Fallas, la Confiabilidad, la Tasa de Falla, la Distribución de Fallas y la probabilidad de falla del Motor 200-MK-2.....	135
Tabla 4. 24. Data histórica del motor 200-MK-2.....	137
Tabla 4. 25. Tiempos fuera de servicio ordenados en forma creciente con sus respectivos valores de $M'(t)$	138
Tabla 4. 26. Resultados de Mantenibilidad del motor 200-MK-2.	141
Tabla 4. 27. Resultados de los Indicadores de Efectividad para el motor 200-MK-2.	144
Tabla 4. 28. Jerarquización de los distintos factores.....	146
Tabla 4. 29. Valoración de los aspectos considerados en la inspección visual.....	148
Tabla 4. 30. Resultados de análisis de lubricante y puntuación de cada parámetro.	151
Tabla 4. 31. Rango de puntos dados por el ENT para evaluar las vibraciones del motor 200-MK-2.	154
Tabla 4. 32. Puntuación asignada por ENT a la evaluación de las vibraciones del motor 200-MK-2.	156

Tabla 4. 33. Puntuación asignada por ENT a la evaluación de la temperatura del cojinete lado libre del motor 200-MK-2.	158
Tabla 4. 34. Resultados de las Pruebas y Mediciones del motor 200-MK-2.	159
Tabla 4. 35. Puntuación asignada por ENT según la evaluación de la edad del motor 200-MK-2.	160
Tabla 4. 36. Puntuación asignada por el ENT según la evaluación del medio ambiente.	161
Tabla 4. 37. Puntuación asignada por el ENT para la evaluación de la carga de trabajo del motor 200-MK-2.	161
Tabla 4. 38. Puntuación dada por el ENT para el factor carga de trabajo.	162
Tabla 4. 39. Resultados de los factores relativos.	162
Tabla 4. 40. Cuadro comparativo de la Confiabilidad obtenida por ambos métodos.	164
Tabla 4. 41. Costos, tasas de fallas y TPFs para el cálculo del VPN de las alternativas.	171
Tabla 4. 42. Datos de Producción y Venta del MTBE.	172
Tabla 4. 43. Vida útil esperada de los equipos.	173
Tabla 4. 44. Montos probables de pérdida de dinero en dólares.	176
Tabla 4. 45. Práctica operativa para el desarmado y ensamblado del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2.	179
Tabla 4. 46. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento semanal del motor 200-MK-2.	182
Tabla 4. 47. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento mensual del motor 200-MK-2.	184
Tabla 4. 48. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento semestral del motor 200-MK-2.	185
Tabla 4. 49. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento en parada de planta del motor 200-MK-2.	186

Tabla 4. 50. Continuación de propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento en
parada de planta del motor 200-MK-2..... 187

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Ubicación de Super Octanos C.A., en el complejo petroquímico “José Antonio Anzoátegui”.	27
Figura 1. 2. Estructura Organizacional de la Empresa Super Octanos C.A., indicando el lugar donde se realizó la pasantía.	31
Figura 2. 1. Esquema del Equipo Natural de Trabajo.	42
Figura 2. 2. Ejemplo de un Diagrama de Pareto.	44
Figura 2. 3. Pasos para realizar el Análisis Causa Raíz.	46
Figura 2. 4. Curva de la bañera.	51
Figura 2. 5. Tiempos Utilizados en el estudio de los Indicadores de Efectividad.	55
Figura 2.6. Costo del Ciclo de Vida de un equipo.	64
Figura 2. 7. Diagrama de flujo del proceso de producción de MTBE en la planta Super Octanos C.A.	67
Figura 2. 8. Ejemplo de un Sistema de Compresión de Aire.	68
Figura 2. 9. Compresor centrífugo de doble flujo.	69
Figura 2. 10. Motor eléctrico donde se indican sus partes principales.	70
Figura 2. 11. Motor eléctrico tipo jaula de ardilla.	73
Figura 2. 12. Motor eléctrico de rotor bobinado.	74
Figura 4. 1. Sub-sistemas que delimitan el estudio del motor 200-MK-2.	85
Figura 4. 2. Vista del motor 200-MK-2.	89
Figura 4. 3. Esquema del sub-sistema de lubricación.	91
Figura 4. 4. Tanque del sub-sistema de lubricación.	92
Figura 4. 5. Motores de las unidades de bombeo del sub-sistema de lubricación.	93
Figura 4. 6. Intercambiadores de Calor del sub-sistema de lubricación.	94
Figura 4. 7. Filtros del sub-sistema de lubricación.	95
Figura 4. 8. Cojinetes de Babbit.	97
Figura 4. 9. Sub-sistema de lubricación en planta.	98

Figura 4. 10. Esquema del sub-sistema de enfriamiento.....	99
Figura 4. 11. Unidades de bombeo 710-MP-1B y 1C del sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.	101
Figura 4. 12. Unidad de bombeo 710-TP-1A del sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.	101
Figura 4. 13. Sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.	102
Figura 4. 14. Esquema del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.	103
Figura 4. 15. Motor eléctrico y caja reductora del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.	105
Figura 4. 16. Anillos Colectores del motor 200-MK-2.....	106
Figura 4. 17. Anillo de Cortocircuito.....	108
Figura 4. 18. Valores de las variables de proceso tomadas en tiempo real.....	109
Figura 4. 19. Valores de las variables controladas del motor 200-MK-2.	110
Figura 4. 20. Diagrama de Pareto de las fallas que se producen en el motor 200-MK-2.....	119
Figura 4. 21. Esquema indicando el equipo critico, en rojo, del motor 200-MK-2. .	120
Figura 4. 22. Árbol de Fallas del Análisis Causa - Raíz divididos en eventos que podrían causar la falla del anillo de cortocircuito.	121
Figura 4. 23. Bloque A del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.	122
Figura 4. 24. Bloque B del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.	123
Figura 4. 25. Bloque C del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.	125
Figura 4. 26. Bloque D del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.	126
Figura 4. 27. Análisis Causa Raíz realizado a la falla del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2.	127
Figura 4. 28. Diagrama del procedimiento de cálculo de los Indicadores de Efectividad.	129
Figura 4. 29. Selección de la distribucion de Weibull en el programa Crystal Ball® 11.0.....	131

Figura 4. 30. Selección de Celdas que poseen los Tiempos entre Fallas.	132
Figura 4. 31. Resultados del ajuste de los datos a la distribución de Weibull.	133
Figura 4. 32. Resultados de los Parámetros de Weibull y tiempo promedio entre fallas.	134
Figura 4. 33. Gráfico de Mantenibilidad en papel funcional Gumbell Tipo I.	139
Figura 4. 34. Confiabilidad y Probabilidad de Falla vs. Tiempo entre Fallas	142
Figura 4. 35. Tasa de Fallas vs. Tiempo entre Fallas.....	142
Figura 4. 36. Función Densidad de Probabilidad vs. Tiempo entre Fallas	143
Figura 4. 37. Mantenibilidad vs. Tiempo Fuera de Servicio.....	143
Figura 4. 38. Gráfica de las zonas de severidad de vibración según la norma ISO 10816-3.	154
Figura 4. 39. Variación de la velocidad de vibración con respecto a los ciclos por minuto en el lado libre posición vertical.	155
Figura 4. 40. Zona de severidad para el motor 200-MK-2.....	156
Figura 4. 41. Imágenes termográfica y normal del cojinete de superficie plana del lado libre.	157
Figura 4. 42. Introducción de los supuestos y el forecast para la simulación.	175
Figura 4. 43. Simulación motor 200-MK-2.	176
Figura 4. 44. Simulación turbina a gas.....	176

ABREVIACIONES Y TÉRMINOS

MTBE	Metil Tert Butil Eter
ENT	Equipo Natural de Trabajo
Lts	Litros
KW	KiloWatts
MW	MegaWatts
V	Voltio
A	Amperio
rpm	Revoluciones por minuto
TM/h	Tonelada métrica por hora
ACR	Análisis Causa Raíz
AMEF	Análisis de Modos y Efectos de Fallas
TPEF	Tiempo promedio entre fallas
TPFS	Tiempo promedio fuera de servicio
ppm	Partes por millón
cSt	Centistokes
Hz	Helz
VPN	Valor Presente Neto
CCV	Costo del Ciclo de Vida
m.c.m	Mínimo común múltiplo
MMUSDS/año	Millones de dólares americanos anuales
TAG	Número de identificación del equipo

INTRODUCCIÓN

Super Octanos, C.A., es una Empresa Mixta constituida por ECOFUEL, firma Italiana filial de Ente Nazionale Idrocarburi (ENI), y por PEQUIVEN, filial de Petróleos de Venezuela (PDVSA). La planta Super Octanos C.A., fue diseñada para producir 500 mil toneladas métricas anuales de Metil-Ter-Butil-Éter (MTBE), este producto tiene como prioridad abastecer el mercado nacional (PDVSA), luego de cubrir los requerimientos del país el excedente se exporta. Sin embargo la producción actual cubre aproximadamente 33% de la exigencia nacional.

Los Indicadores de Efectividad de un sistema o equipo en particular, son importantes ya que mediante expresiones cuantitativas, que son comparadas con algún nivel de referencia propuesto por la empresa, demuestran desviaciones que reflejan el impacto de las políticas de mantenimiento, considerando estos resultados se tomarán acciones correctivas o preventivas según el caso. En el caso del motor 200-MK-2 los Indicadores de Efectividad son aún más importantes ya que es un equipo crítico, es decir, funciona en línea para continuar todos los procesos de la planta Super Octanos C.A., su pérdida o parada afecta considerablemente la productividad y las ganancias. Las acciones de mantenimiento dirigidas al motor 200-MK-2 favorecerán directamente al sistema de compresión de aire impidiendo que este quede fuera de servicio por fallas en dicho motor, y al mismo tiempo evitando la parada de la planta Super Octanos, C.A. Considerando lo anterior, el Departamento de Confiabilidad de la empresa, en busca de mejorar las actividades de mantenimiento del motor 200-MK-2, propuso realizar una evaluación técnica del comportamiento operacional basada en indicadores de efectividad del motor 200-MK-2, para de esta manera alcanzar la mayor eficiencia y productividad posible del sistema de compresión de aire, maximizando el uso de sus recursos, minimizando los costos y reduciendo las pérdidas por paradas sin que ello implique afectar las

operaciones de producción de la planta. El Equipo Natural de Trabajo decidió, en reuniones establecidas, que se calcularan los Indicadores de Efectividad, Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, tomando en cuenta los tiempos fuera de servicio y los tiempos de operación. Además, debido a las pruebas y mediciones con las que cuenta la empresa, el ENT decidió que se estimara el Índice Relativo de Confiabilidad, mediante el estudio de los factores de inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo, lo que permitió conocer el estado operativo actual del motor 200-MK-2, todo con el objeto de recomendar cambios ó estrategias de mantenimiento en busca de mejorar la efectividad del motor 200-MK-2.

En general, la implementación de acciones que mejoren los indicadores de efectividad, permitirá reducir los riesgos existentes, tanto para el personal como para los equipos que se exponen durante una parada imprevista e incrementará la eficiencia de la gestión del mantenimiento garantizando la continuidad operativa y mejorando los niveles de rentabilidad del sistema de compresión de aire.

El cuerpo de este trabajo, está estructurado como sigue:

Capítulo I: Presenta aspectos generales de la empresa, y se expone de manera detallada el problema en estudio, los objetivos y la justificación de la investigación.

Capítulo II: Engloba las bases teóricas sobre las cuales se fundamenta el estudio, además de la definición de términos básicos.

Capítulo III: Muestra una explicación detallada de la metodología implementada en el desarrollo de la investigación, como: tipo de investigación, población, técnicas empleadas en la recolección, redacción y análisis de los datos, programas utilizados, descripción de equipos y materiales.

Capítulo IV: Presenta el desarrollo de los objetivos y los resultados sobre los cuales se soportan las propuestas de mejoras. Para finalizar se exponen las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. La empresa

1.1.1. Reseña Histórica de la Empresa

Un paso fundamental para el desarrollo petroquímico del Oriente de Venezuela fue la constitución, el 24 de Marzo de 1.987 y posterior apertura en Marzo de 1.991, de Super Octanos, C.A., la primera planta de Metil-Ter-Butil-Éter (MTBE) del país, una de las mayores de su tipo en el Hemisferio Occidental y en el Mundo, *ubicada en el Complejo Petroquímico “José Antonio Anzoátegui” en Jose, Jurisdicción del Municipio Bolívar del Estado Anzoátegui*, cuya capacidad de producción alcanza las 500 mil toneladas métricas anuales de MTBE, producto oxigenado no contaminante que se agrega a la gasolina para elevar su octanaje, en sustitución de aditivos como el tetraetilo de plomo. En la figura 1.1 se observa la ubicación de la planta Super Octanos C.A., en el complejo petroquímico de Jose.

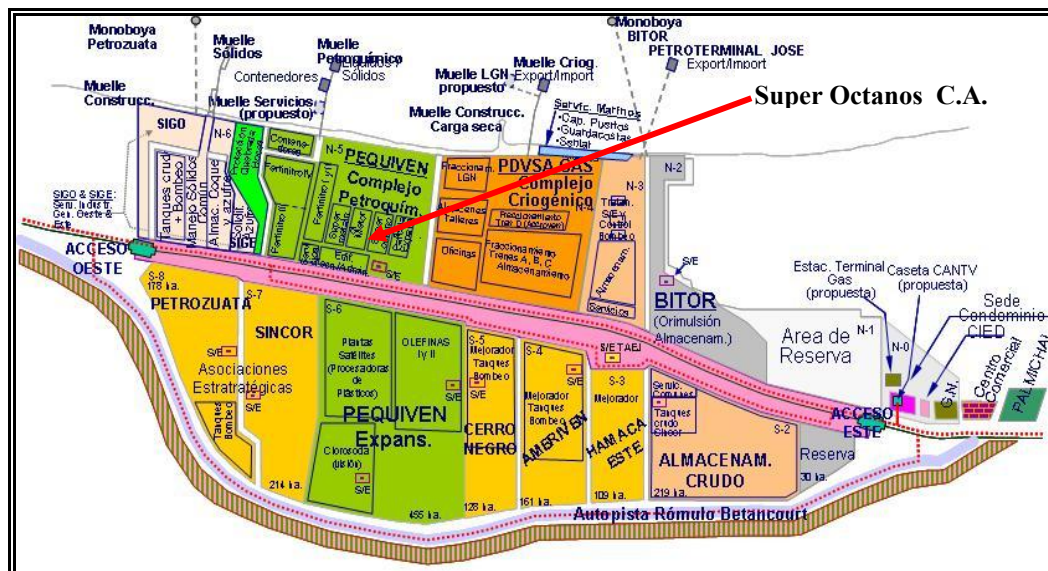


Figura 1. 1. Ubicación de Super Octanos C.A., en el complejo petroquímico “José Antonio Anzoátegui”.

Fuente: Petróleos de Venezuela S.A.

Súper Octanos, C.A. es una Empresa Mixta constituida por ECOFUEL, subsidiaria de AGIP PETROLI, firma Italiana filial de ENTE NAZIONALE IDROCARBURI (ENI), y por PEQUIVEN, filial de Petróleos de Venezuela (PDVSA), ambas con participación individual en acciones de 49%, estando el restante 2% colocado en el Mercado Nacional de Valores Venezolano (Sociedad Financiera Mercantil – Grupo Privado).

La Ingeniería, Procura, Construcción y Arranque de la planta estuvo a cargo del Consorcio integrado por las Empresas SNAMPROGETTI, filial de ENI-ITALIA y TECNOCONSULT de Venezuela, el cual empleó 250 mil horas/hombre en ingeniería, de las cuales 100 mil fueron ejecutadas por la firma Nacional, utilizándose así mismo 370 mil horas/hombre en gestión de apoyo. La ejecución de la planta de MTBE, requirió una inversión de 297 millones de dólares, invirtiéndose un 42% de esa cantidad en bienes y servicios adquiridos en el país.

La planta de MTBE, tiene como prioridad abastecer el mercado nacional (PDVSA), luego de cubrir los requerimientos del país el excedente se exporta. Sin embargo la producción actual cubre aproximadamente 33% de la exigencia nacional. Por otro lado, a corto plazo se desarrollará el proyecto de reconversión de la planta para producir, además de MTBE, Iso-Octano (compuesto con características similares al Metil-Ter-Butil-Éter).

1.1.2. Misión y Visión

La misión empresarial de Super Octanos, C.A., es generar el mayor rendimiento económico posible a sus accionistas, lo cual implica:

- La satisfacción cabal de sus clientes.
- La óptima calidad de su producción industrial, de acuerdo a los más altos niveles de exigencia internacional.
- El desempeño eficiente y productivo de su personal en la ejecución de las labores encomendadas.
- El desarrollo profesional y personal de sus recursos humanos, así como una remuneración justa y competitiva por las labores que realizan.

Todo ello exige una excelencia organizacional y la calidad total en todos los procesos. La visión representa el propósito corporativo de la dirección de cara al futuro y como proyecta su imagen hacia el cliente externo.

Super Octanos, C.A se proyecta como una empresa económicamente viable, rentable y estable en el tiempo, altamente competitiva internacionalmente por las ventajas comparativas de sus insumos industriales, merecedora de ser un proveedor seguro, confiable y preferido de su producción industrial.

1.1.3. Objetivos de la Empresa.

El principal objetivo de Super Octanos C.A., es la producción de MTBE (Metil-Ter-Butil-Éter) para su comercialización en el mercado petroquímico mundial en consonancia con el ambiente, ya que reduce la emisión de compuestos volátiles nocivos a la atmósfera tales como monóxido de carbono e hidrocarburos, descargados con los gases de escape de los vehículos automotores cuando existe una combustión incompleta.

Por otra parte, Super Octanos, C.A. persigue mejorar las políticas para el desarrollo del recurso humano, esfuerzos aplicados en las distintas etapas del proceso de producción, lo cual garantiza que sus actividades tanto operativas como administrativas se realicen con un alto grado de productividad.

1.1.4. Política de Calidad de la Empresa.

Es de vital importancia para Super Octanos, C.A. enmarcar todas las actividades de la empresa dentro de la búsqueda continua de la excelencia en todas sus operaciones, con el propósito que sea reconocida internacionalmente por sus clientes como un proveedor de MTBE confiable, seguro, competitivo y por ende preferido.

En atención a ello, es política de Super Octanos, C.A.:

- Que la calidad total sea el principio que orienta todas las decisiones y operaciones empresariales e industriales.
- La estrategia, los criterios, las técnicas e instrumentos para el mejoramiento iterativo de la calidad y búsqueda de la excelencia, penetren en todos los estratos jerárquicos de la organización.

- La medida para el alcance de la calidad es el grado de aumento iterativo de la satisfacción de:
 - Los clientes internos, unidades organizacionales o individuales de la empresa, que utilizan el trabajo o productos de otras unidades o personas para agregar valor a la cadena productiva hasta el cliente final.
 - Los clientes externos que consideran a Super Octanos, C.A., como proveedor preferido por la calidad y competitividad de su producción industrial y confiabilidad comercial de la empresa.

- La búsqueda de la excelencia organizacional y la calidad total, constituye la filosofía del trabajo de la empresa. Ello exige de parte de todos los niveles de supervisión la acción motivadora, la capacitación del personal a su cargo y servir de modelo para que toda la organización convierta esa política en la manera usual de trabajo.

- El alcance individual y colectivo de altos índices de calidad y productividad es un componente básico que se asocia al crecimiento profesional y personal de todos los trabajadores de la empresa, la cual distingue y premia el esfuerzo individual y/o colectivo en el alcance de las metas de calidad total.

En la figura 1.2, se muestra el organigrama de la empresa Super Octanos C.A. Este organigrama muestra todas las áreas administrativas de la empresa y la ubicación del Departamento donde se realizó el estudio.

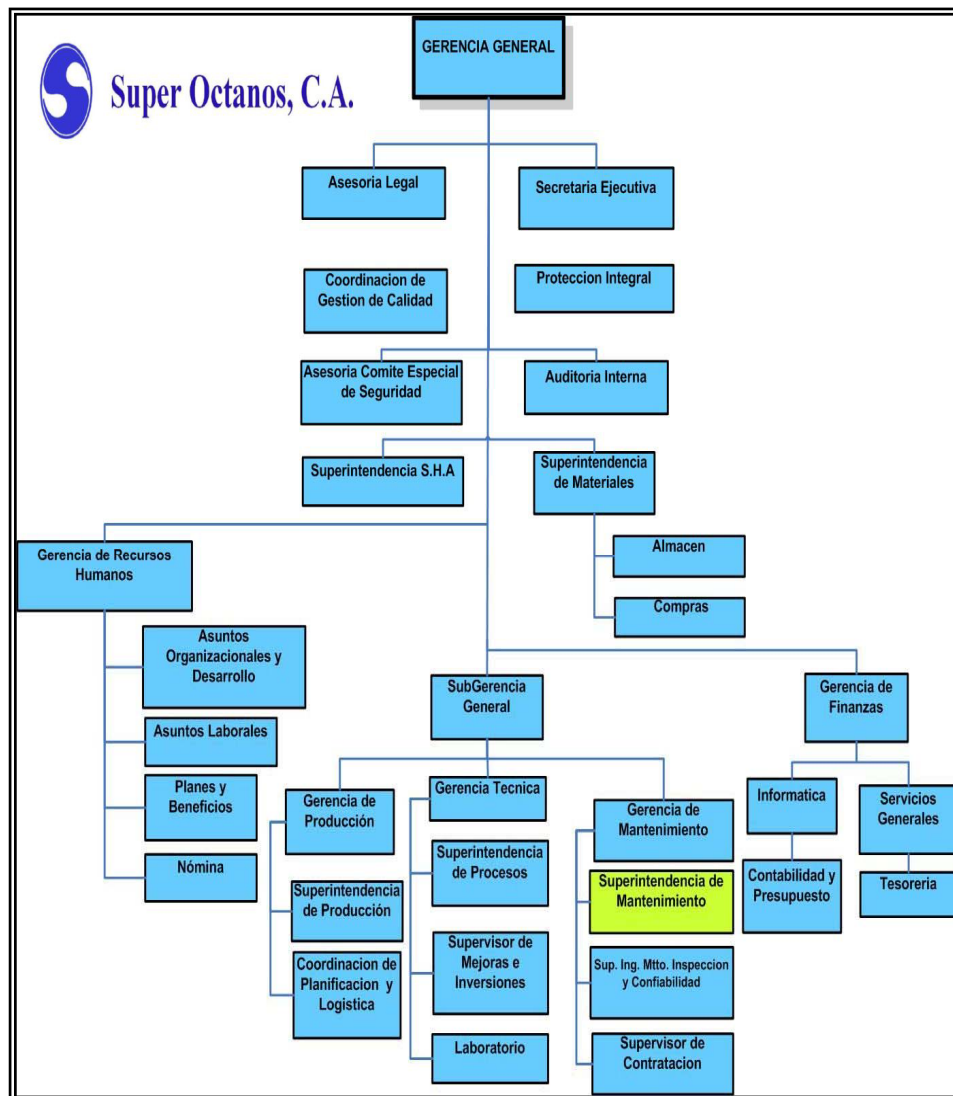


Figura 1. 2. Estructura Organizacional de la Empresa Super Octanos C.A., indicando el lugar donde se realizó la pasantía.

Fuente: Super Octanos C.A.

1.2. Planteamiento del problema

Súper Octanos,C.A., es la primera planta productora de Metil Ter-Butil Éter (MTBE) del país, líquido inflamable no contaminante, de olor característico desagradable, el cual resulta de la combinación de las sustancias químicas isobutileno

y metanol, y es utilizado por las refinerías, para mejorar el octanaje de la gasolina de motores de combustión interna al sustituir el tetraetilo de plomo por este compuesto y así mismo reducir los volúmenes de emisión de hidrocarburos nocivos al ambiente. Para cumplir con la función de producir MTBE, esta planta está conformada por siete secciones operativas, la unidad 110 de isomerización, la unidad 120 de desbutanización, la unidad 200 de deshidrogenación, la unidad 300 de síntesis de MTBE, la unidad 700 de servicios, la unidad 800 de almacenaje y la unidad 900 de despacho.

La unidad 200 de deshidrogenación, se encarga de convertir el isobutano en isobutileno, el proceso se lleva a cabo en cuatro reactores de lecho fijo con la ayuda de un catalizador de óxido de cromo. Durante esta conversión se produce coque que se deposita sobre el catalizador disminuyendo las propiedades de este. El sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200, succiona aire de la atmósfera que va a los reactores, donde se utiliza para quemar el coque depositado en el catalizador y para restaurar el perfil de temperatura en el lecho del reactor a su condición inicial, dejando todo preparado para que se vuelva a cumplir otro ciclo de conversión. Este sistema de compresión de aire está constituido principalmente por un motor eléctrico de 11 Megawatts (MW), designado en la planta como 200-MK-2, una caja multiplicadora y un compresor centrífugo de 9,6 Megawatts (MW).

Actualmente el motor 200-MK-2, ha presentado fallas, algunas de ellas son: fuga de aceite por sellos, altos niveles de temperatura y vibración en los cojinetes, y fallas del anillo de cortocircuito. Por otro lado, el motor 200-MK-2 fue seleccionado para operar en el sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200 y suministrar la potencia necesaria para que el compresor succione aire de la atmósfera a razón de 395 TM/h, pero el registro actual es de 471 TM/h. Cuando el motor 200-MK-2 deja de funcionar de forma inesperada, provoca una alteración en los planes productivos. En muchos casos no puede repararse rápidamente, dando como resultado

bajas económicas por la pérdida de producción, en otros casos debe recargarse al personal de mantenimiento u operación de horas extras para llegar a los niveles de producción necesarios, esto provoca que las condiciones de trabajo no sean las mejores, por lo que el personal queda expuesto a accidentes laborales.

Por lo anteriormente descrito, el departamento de confiabilidad de la empresa Super Octanos C.A., realizó una evaluación técnica del comportamiento operacional del motor 200-MK-2 basado en Indicadores de Efectividad; la caja multiplicadora y el compresor centrífugo han presentado una baja tasa de fallas en los últimos años, por lo que el Departamento ha decidido enfocar el estudio solo a la evaluación del motor. Para la realización del estudio se utilizaron metodologías de la confiabilidad operacional como son el Análisis de Modos y Efectos de Fallas, el Principio de Pareto y el Análisis Causa Raíz. Además se utilizaron herramientas computacionales para la estimación de los Indicadores de Efectividad; Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, considerando tiempos entre fallas y tiempos fuera de servicio. En términos generales, la implementación de acciones que mejoren los indicadores de efectividad, permitirá reducir los riesgos existentes, tanto para el personal como para los equipos que se exponen durante una parada imprevista e incrementará la efectividad de la gestión del mantenimiento garantizando la continuidad operativa y mejorando los niveles de rentabilidad del sistema de producción.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo General

Evaluar técnicamente el comportamiento operacional basado en indicadores de efectividad del motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración de la planta Super Octanos C.A., Jose – Edo – Anzoátegui.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Diagnosticar la situación actual del motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración de la planta Super Octanos C.A., en función al contexto operacional.
2. Realizar un análisis de modos y efectos de fallas del motor 200-MK-2.
3. Realizar un análisis causa raíz en los componentes del motor 200-MK-2 para la determinación del origen de la falla.
4. Estimar los Indicadores de Efectividad del motor 200-MK-2: Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.
5. Evaluar técnicamente el comportamiento operacional del motor 200-MK-2 basado en los indicadores de efectividad: Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

La empresa Super Octanos C.A., debe garantizar la producción y comercialización de Metil Tert-Butil Eter (MTBE) con prioridad hacia el mercado nacional y con capacidad de exportación. El presente trabajo de investigación surgió ante tal necesidad y fue requerido por el Departamento de Confiabilidad de la empresa Super Octanos C.A. Estuvo dirigido hacia el motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración y persiguió la evaluación integral en búsqueda de determinar las causas del incremento en la tasa de fallas en este equipo, así como proponer soluciones que busquen maximizar su Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad en el sistema de producción de MTBE.

Por otra parte, éste trabajo de investigación fundamentó su importancia en tres aspectos de índole: técnica, económica y académica. A nivel técnico, está representado como una herramienta de fácil utilización y mínima inversión de tiempo para cálculos de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, que permite obtener resultados estimados en gráficas acordes con el registro de fallas del equipo en un tiempo de horas determinado.

A nivel económico, constituyó una herramienta capaz de poder dirigir efectivamente los recursos asignados a labores de mantenimiento, disminuir los costos en actividades innecesarias y/o en las pérdidas de la producción de MTBE así como también dar alternativas y propuestas de mejoras al equipo. En el ámbito académico, representa un avance en la formación de profesionales de pre-grado en la especialidad de Ingeniería Mecánica enfocados en el ramo de sistemas dinámicos y mantenimiento, por el conocimiento de técnicas de mantenimiento de clase mundial y la utilización de programas que facilitan la evaluación de equipos en el área de mantenimiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En el área de mantenimiento existen una gran cantidad de trabajos desarrollados que hacen referencia a **Evaluaciones Técnicas basada en los Indicadores de Efectividad**, estos representan una importante ayuda para lograr solucionar el problema de mejorar el desempeño y funcionamiento de un equipo en particular e incrementar la disponibilidad del mismo dentro de cualquier proceso, y de esta manera lograr los objetivos planteados por la organización. Entre los trabajos desarrollados recientemente y que sirvieron de base a este estudio se encuentran:

- **Gutiérrez, D. (2009).** Realizó un trabajo de grado en la Universidad de Oriente como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, el cual lleva por nombre "**Evaluación Técnica del Comportamiento Operacional Basada en los Indicadores de Efectividad de los Aeroenfriadores de Procesos del Mejorador de Crudo PDVSA - Petrocedeño**", con el fin de evaluar la situación operacional de la totalidad de los aeroenfriadores a nivel del mejorador clasificándolos por unidades de procesos. Entre las conclusiones logradas por el autor, se destaca que la mayor causa de falla que origina la rotura de correas en el sistema de transmisión de potencia en los equipos críticos se debe a la localización de estos en zonas de ambiente adverso para su correcto funcionamiento así como también al material con el cual fueron fabricadas las poleas. [1]

- **Bueno, L. (2006).** Realizó un trabajo de grado en la Universidad de Oriente como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, el cual lleva por nombre **“Evaluación de los Indicadores de la Gestión de Mantenimiento Asociada a un Sistema de Sopladores Centrífugos para el Diseño de Programas de Mantenimiento”**. En este proyecto se evaluarón una serie de criterios y parámetros para el diseño de programas de mantenimiento preventivo, uno de estos fue la estimación de los indicadores de gestión de mantenimiento. Dentro de las conclusiones de este proyecto, se destacaron que los procedimientos de seguridad influyen sobre el tiempo de ejecución de las actividades de mantenimiento, el análisis de criticidad sirve para jerarquizar los equipos y mejorar de manera considerable las estrategias de mantenimiento y que los indicadores de gestión de mantenimiento sirven para conocer el estado de vida en que se encuentran los equipos a la hora del estudio. [2]

- **Mosquera, L. (2004).** Realizó un trabajo de grado en la Universidad de Oriente como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, el cual lleva por nombre **“Evaluación Técnica del Sistema de Transmisión de Potencia de los Aeroenfriadores, Sistema de Lubricación de los Sellos de Bombas y Sistema de Protección por Sobrevelocidad de Turbinas de Vapor”** donde desarrolló la evaluación técnica y los procedimientos necesarios para la planificación del mantenimiento del sistema de transmisión de potencia de los Aeroenfriadores del mejorador de crudo Ameriven. Entre las conclusiones logradas por el autor, se destacan que la mayor causa de fallas en el sistema de transmisión de potencia de los aeroenfriadores es la falta de procedimientos para la instalación, ajuste y mantenimiento de los elementos del sistema, así como también, la elaboración de planes de procedimientos para el ajuste de la tensión y cambio de las correas dentadas, el cambio de poleas, la lubricación de los rodamientos y mantenimiento del sistema. [3]

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Conceptos y Principios Básicos

➤ Mantenimiento

Son el conjunto de acciones que minimizan los fallos y restablecen el funcionamiento del sistema cuando se produce un estado de fallo. [4]

➤ Falla

Es un hecho no previsible inherente a un sistema que desvía su comportamiento al descrito en su especificación y que en la mayoría de los casos impide que este cumpla su misión. [4]

➤ Planificación de Mantenimiento

Es el diseño de programas de actividades de mantenimiento, distribuidas en el tiempo, con una frecuencia específica y dinámica que permite mantener los equipos en operación para cumplir con las metas de producción preestablecidas por la organización. [5]

➤ Mantenimiento Preventivo

Es un conjunto de tareas que se efectúan sobre una máquina de acuerdo a una frecuencia determinada con el fin de disminuir, al menor costo posible, la probabilidad de falla de la misma. Estas tareas se efectúan aunque la máquina no falle y generalmente es necesario sacarla de servicio para hacerlas. [4]

➤ **Mantenimiento Predictivo**

Consiste en efectuar en una máquina mediciones periódicas, de variables previamente elegidas y, mediante comparaciones sistemáticas, establecer la necesidad – o no – de efectuar trabajos de mantenimiento. No hay necesidad de sacar la máquina de servicio. [4]

➤ **Mantenimiento Correctivo**

Es un conjunto de tareas, que se efectúan sobre una máquina que ha sufrido una falla, con la finalidad de restablecer su capacidad para cumplir su función. Siempre es necesario sacar la máquina de servicio. [4]

➤ **Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (M.C.C)**

Es una metodología que procura determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto operacional. Consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuales son sus posibles fallas, y detectar los modos de fallas o causas de fallas, estudiar sus efectos y analizar sus consecuencias. A partir de la evaluación de las consecuencias es que se determinan las estrategias más adecuadas al contexto de operación, siendo exigido que no solo sean técnicamente factibles, sino económicamente viables. [6]

➤ **Confiabilidad Operacional**

Se define como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control, de la producción industrial. [6]

➤ **Contexto Operacional**

Son las circunstancias en las cuales se espera que opere un activo físico o sistema. [7]

➤ **Complejo:**

Sistema compuesto, donde se realizan gran cantidad de funciones que permiten la elaboración de los productos requeridos, ejemplo: complejo de refinación de petróleo. [7]

➤ **Unidades de proceso**

Son las principales unidades de subdivisión dentro del complejo, por ejemplo en una unidad de explotación de petróleo, se tienen unidades de compresión de gas, de bombeo, etc. Ejemplos: Planta de Aire, Plantas de Vapor, etc. [7]

➤ **Sistemas**

Son las principales divisiones dentro de una unidad de proceso, y ejecutan una función específica dentro del proceso, por ejemplo un sistema de aire de instrumentos y de aire de servicios industriales, en la unidad de proceso Planta de Aire. [7]

➤ **Subsistemas**

Unidades de subdivisión de sistemas muy complejos. Ejemplo subsistema de compresión de aire del sistema, de aire de instrumentos. [7]

➤ **Equipo**

Elemento físico que normalmente realiza una sola función principal, que permite la operación de los sistemas, por ejemplo: bombas, filtros, separadores, etc. [7]

➤ **Componentes o partes**

Son los elementos de menor nivel y normalmente responsables de las fallas y hacia donde están dirigidas las tareas de mantenimiento, ejemplo: alabes de turbinas, sellos de bombas, etc. [7]

2.2.2. Equipo Natural de Trabajo (ENT)

Se define como el conjunto de personas de diferentes funciones de la organización, que trabajan juntas por un periodo de tiempo determinado en un clima de potenciación de energía, para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común. [8]

Una de las características principales en la industria moderna es la conciencia sobre la visión que guía las acciones de los Equipos Naturales de Trabajo, con el objeto de asegurar la implementación de las estrategias de confiabilidad, la sincronización de actividades, el establecimiento de planes integrales de acción y la optimización integral de los costos de producción y mantenimiento de la organización.

Los miembros de un Equipo Natural de Trabajo, no deben ser más de diez personas y deben formarse típicamente como se observa en la figura 2.1, con uno o dos representantes por las funciones disímiles.



Figura 2. 1. Esquema del Equipo Natural de Trabajo.

Fuente: Suárez. D. (2007)

2.2.3. Análisis de Modos y Efectos de Falla (A.M.E.F.)

Es una herramienta que permite identificar las variables significativas del proceso/producto de una forma sistemática, asegurando que han sido tenidos en cuenta todos los fallos potencialmente concebibles, para poder determinar y establecer las acciones correctoras necesarias para la prevención del fallo, o la detección del mismo si este se produce. [4]

Las cuatro primeras preguntas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad ayudan a identificar las fallas funcionales, los modos de falla que probablemente causen cada falla funcional y los efectos de falla asociados con cada modo de falla. Las cuatro preguntas son:

1. ¿Cuáles son las funciones que queremos que el equipo haga?

Función: Son los propósitos para los cuales se adquirió el equipo. En otras palabras, deberá tener una función o funciones específicas. [4]

2. ¿De que forma se puede fallar?

Falla Funcional: Es el estado en el cual un activo físico o sistema no es capaz de ejecutar una función específica para un nivel deseado de desempeño. [4]

3. ¿Qué causa la falla?

Modo de falla: Un modo de falla es una posible causa por la cual un equipo puede llegar a un estado de falla. [4]

4. ¿Qué sucede cuando falla?

Efecto de falla: Es la consecuencia que pueda traer consigo la ocurrencia de un modo de falla, tal y como la experimentaría el equipo. [4]

El AMEF es una herramienta muy útil dentro de las empresas o sistemas productivos, entre las aplicaciones más importantes se tienen: Aplicaciones para la confiabilidad desde la etapa de diseño y revisión de rediseños, Elaboración de planes de mantenimiento utilizando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), Revisión de actividades preestablecidas de mantenimiento (MCC en reserva) y Análisis de seguridad.

2.2.4. Diagrama de Pareto

Es una representación gráfica de los datos obtenidos sobre un problema, que ayuda a identificar y seleccionar los aspectos prioritarios que hay que tratar. También se conoce como diagrama ABC o Ley de las Prioridades 20-80, que dice: “el 80% de los problemas que ocurren en cualquier actividad son ocasionados por el 20% de los elementos que intervienen en producirlos”. [9]

Los pasos a seguir para su representación son:

1. Anotar, en orden progresivo decreciente, los fallos o averías a analizar.
2. Calcular y anotar, a su derecha, el peso relativo de cada uno (porcentaje).
3. Calcular y anotar, a su derecha, el valor acumulado (porcentaje acumulado).
4. Representar los elementos en porcentajes decrecientes de izquierda a derecha (histograma) y la curva de porcentaje acumulado (curva ABC).

A continuación en la figura 2.2 se muestra un ejemplo de un diagrama de Pareto.

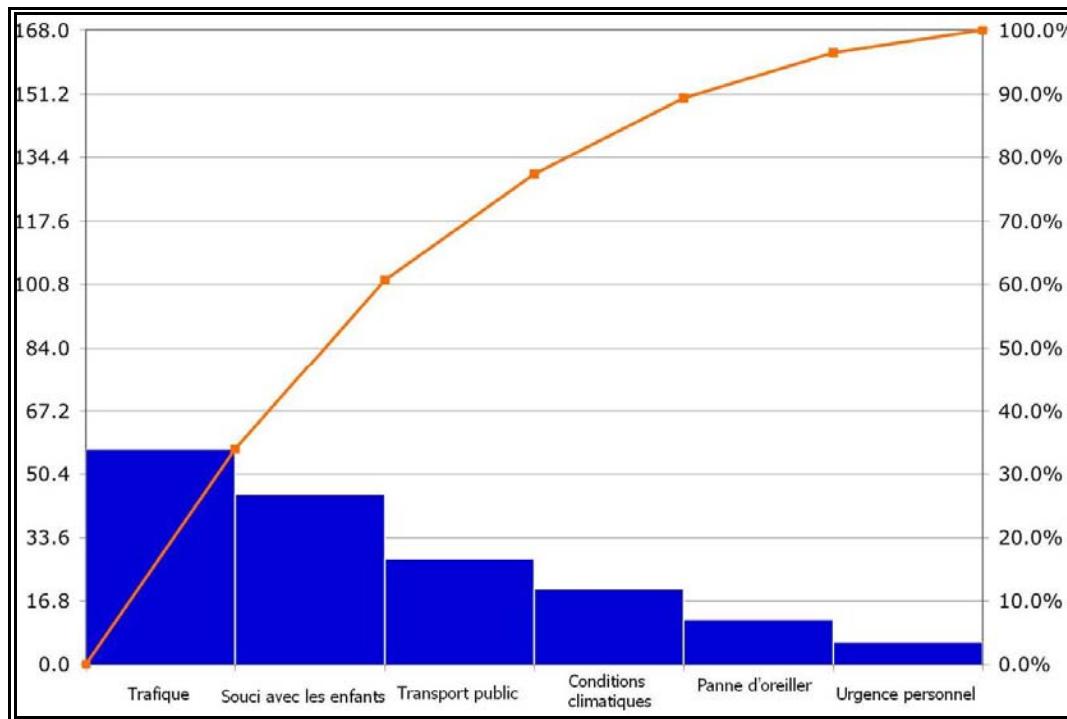


Figura 2. 2. Ejemplo de un Diagrama de Pareto.

Fuente: Reliability World (2005)

2.2.5. Análisis de Árbol de Fallas

Es un método que permite identificar todas las posibles causas de un modo de falla en un sistema en particular. Los pasos para construir un “árbol lógico de fallas” en la aplicación de un Análisis Causa Raíz, son: [9]

1. Describir el evento de falla.
2. Describir los modos de falla.
3. Hacer una lista de las causas potenciales de falla y verificarlas.
4. Determinar y verificar las causas raíces físicas.
5. Determinar y verificar las causas raíces humanas.
6. Determinar y verificar las causas raíz del sistema (latentes).

2.2.6. Análisis Causa Raíz (A.C.R.)

Dentro del marco de confiabilidad es la herramienta principal para determinar las causas fundamentales que generan una repetición de falla o en su defecto dentro de un conjunto de fallas, la anomalía de mayor peso en cuanto al impacto operacional, económico y de seguridad y ambiente. Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para luego mitigarlas o suprimirlas totalmente. Se aplica generalmente en problemas puntuales para equipos críticos de un proceso o cuando existe la presencia de fallas repetitivas. [9]

- 1. Identificar los eventos más significativos:** En este paso se recolecta la información, se definen las fallas y se calculan las pérdidas debido a las fallas ocurridas. El objetivo es determinar cuales son los eventos y fallas más importantes. La herramienta apropiada es el análisis de Pareto, que afirma que el 80% de los costos de las fallas son causados por el 20% de las fallas totales. [9]

2. **Preservar las evidencias de las fallas:** Es la parte en la que se comienza a analizar un problema específico. La recolección de datos es una parte integral del Análisis Causa Raíz. [9]
3. **Ordenar el análisis:** Es la organización del equipo de trabajo y el procedimiento. La forma convencional de formar un equipo de análisis es mediante la asignación de un grupo de personas, que deben ser expertos y tener conocimientos relacionados directamente con los problemas a analizar. [9]
4. **Construir el Árbol Lógico de Fallas:** El análisis debe continuar con la construcción estructurada del árbol lógico de fallas con niveles de causa y efecto. [9]
5. **Comunicar los resultados y las recomendaciones:** Comunicar los resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos en las investigaciones de ACR y las recomendaciones asociadas. [9]

En la figura 2.3 se muestra la estructura del Análisis Causa Raíz.

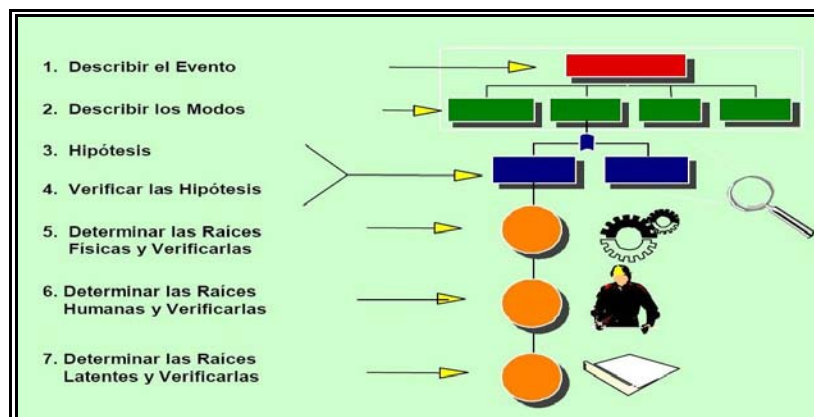


Figura 2. 3. Pasos para realizar el Análisis Causa Raíz.

Fuente: García, O. (2005)

Mediante la aplicación del ACR en las distintas industrias se han localizado causas comunes de fallas, las cuáles se agrupan en tres niveles del ACR.

- **Raíces Físicas:** Es la causa tangible de porque está ocurriendo una falla. Siempre proviene de una raíz humana o latente. Son las más fáciles de tratar y siempre requieren verificación. [9]
- **Raíces Humanas:** Es producto de errores humanos motivados por sus inapropiadas intervenciones. Nacen por la ausencia de decisiones acertadas, que pueden ser por convicción u omisión. Nunca utiliza nombres individuales o grupales cuando se especifica la causa. [9]
- **Raíces Latentes:** Son producto de la deficiencia de los sistemas de información. Proviene de errores humanos. En ciertas ocasiones afectan mas que el problema que se está estudiando, ya que pueden generar circunstancias que ocasionan nuevas fallas. [9]

2.2.7. Distribuciones de Probabilidad

Son modelos gráficos que relacionan los diversos probables valores que puede tomar una variable aleatoria, con la frecuencia de ocurrencia de cada uno de estos probables valores. Tradicionalmente se clasifica a las distribuciones de probabilidad en dos grandes familias: Distribuciones No Paramétricas y Distribuciones Paramétricas. [10]

2.2.7.1. Distribuciones No Paramétricas

Son esencialmente modelos gráficos que representan un grupo particular de observaciones de una variable aleatoria (la que puede tomar un conjunto de valores cada uno de los cuales tiene una probabilidad de ocurrencia) y que relacionan los diversos valores de la variable que se analiza, con su probabilidad de ocurrencia. Las

Distribuciones No Paramétricas son el objeto de estudio de un campo especial de la Estadística conocido como “Estadística No Paramétrica”. [10]

2.2.7.2. Distribuciones Paramétricas

Una distribución de probabilidad paramétrica es una función matemática teórica, que describe la forma en que se espera que varíen los resultados de un experimento, es decir, una función matemática que relaciona los diversos probables valores que puede tomar una variable aleatoria, con la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos. Algunas de las distribuciones de probabilidad paramétricas más usadas para variables aleatorias continuas son las siguientes: Distribución Normal, Distribución Lognormal, Distribución Exponencial, Distribución Weibull, Distribución Beta, Distribución Gamma, Distribución Triangular, Distribución Uniforme. [10]

A continuación se describe la Distribución de Weibull.

a) Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una función de estadística múltiple, cambia fácilmente, es asimétrica y presenta diferentes valores para la media y la mediana. Se presenta como una aproximación de la distribución normal, o como una representación de la tendencia exponencial. La distribución de Weibull fue desarrollada por el Dr. Waloddi Weibull en 1937 cuando comparaba ratas de mortalidad de diferentes grupos poblacionales. [10]

La ecuación 2.1 determina la confiabilidad de Weibull mediante tres parámetros:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.1)$$

Donde $R(t)$ representa la confiabilidad, es decir, la probabilidad de que un componente o equipo desempeñe su función requerida para un periodo específico de tiempo “ t ” y los parámetros β , γ y η tienen una interpretación física, como se explica a continuación:

- γ (Parámetro de Posición): Define si la nube de puntos en la gráfica de Weibull se ajusta a una recta.
- η (Parámetro de Escala): Es un parámetro que ayuda a definir la vida característica del equipo y corresponde al tiempo para el cual los equipos tienen una probabilidad de fallas de 63,2 %, la cual pasa por el punto Weibull.
Vida Característica = $\eta + \gamma$
- β (Parámetro de Forma): Define en qué fase de la vida se encuentra el componente o equipo (Curva de la bañera o similar)

Casos:

$\beta < 1 \Rightarrow$ *Mortalidad Infantil*: Es el período al inicio de la operación, donde con frecuencia ocurren fallas prematuras debidas a defectos no detectados, defectos de diseño no corregidos, errores en la fabricación y el montaje.

$\beta = 1 \Rightarrow$ *Operación Normal*: Indica que las fallas son totalmente aleatorias y no depende del tiempo transcurrido desde la última falla.

$\beta > 1 \Rightarrow$ *Envejecimiento o Desgaste*: Periodo donde los elementos del equipo sufren un proceso de deterioro físico debido al roce mecánico u otras consideraciones.

Para determinar los parámetros de la distribución de Weibull, se pueden utilizar varios métodos, como lo son: el gráfico (Shigley), el analítico (Ecuaciones Logarítmicas) y el estadístico (Regresión Múltiple), este último se hace mediante softwares especializados donde se destacan: Weibull 7 ++, Statgrafics, Crystall Ball entre otros, que facilitan de manera significativa el tiempo en el cálculo y dan una mayor confianza en los resultados obtenidos.

El estudio de la confiabilidad para este trabajo de investigación, se complementa con las siguientes ecuaciones de la distribución de Weibull: [5]

- **Tasa de Fallas $\lambda(t)$:** Representa la proporción de fallas por unidad de tiempo. Especifica las fallas instantáneas o la tasa de muerte en el tiempo t , dado que un objeto ha sobrevivido hasta el tiempo t .

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.2)$$

En la figura 2.4 se muestra la curva de la bañera, que es una representación gráfica de la tasa de fallas con respecto al tiempo.

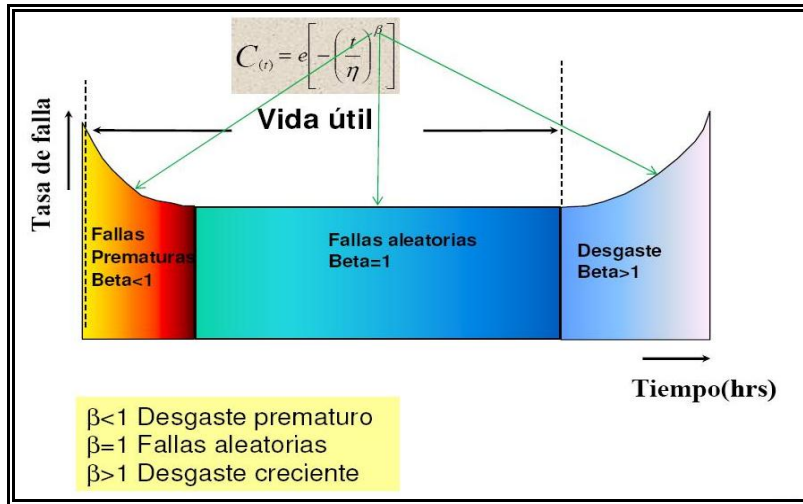


Figura 2. 4. Curva de la bañera.

Fuente: Reliability World. (2005)

- **Función densidad de probabilidad $f(t)$:** Es una representación matemática que relaciona cualquier valor t_i que pueda tomar la variable aleatoria “tiempo”, con su probabilidad de ocurrencia $f(t_i)$.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.3)$$

- **Función Acumulativa de Distribución de Fallas $F(t)$:** Es una representación matemática que relaciona cualquier valor t_i de la variable aleatoria “tiempo”, con la probabilidad de observar valores “menores o iguales” a dicho valor t_i .

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.4)$$

2.2.8. Indicadores de Efectividad en el Mantenimiento

Los Indicadores de Efectividad, son una muestra de como se comporta un proceso en particular por medio de una relación entre variables cuantitativas o cualitativas y que permiten analizar o estudiar la situación y las tendencias de cambio generadas por un fenómeno determinado, respecto a unos objetivos y metas previstas o ya indicadas.

De esta manera se puede retroalimentar el sistema de información para establecer los procedimientos de control, corregir posibles desviaciones, reducir costos de gestión y reorientar el proceso hacia la visión deseada. [11]

Estos indicadores de efectividad son:

a) Confiabilidad: Es la probabilidad de que un equipo o sistema opere sin falla por un determinado periodo de tiempo, bajo unas condiciones de operación previamente establecidas.

Para conseguir un verdadero entendimiento de la manera como fallan los equipos de una planta mediante el análisis de tiempos de vida de componentes soportado por el análisis de Weibull, es necesario determinar sus parámetros de falla. En este trabajo de investigación la confiabilidad viene dada por la ecuación 2.1.

b) Mantenibilidad: Es la probabilidad de que un activo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir su misión en un tiempo dado, luego de la aparición de una falla y cuando el mantenimiento es realizado bajo las condiciones, con los medios y procedimientos preestablecidos. [11]

En este trabajo de investigación se utilizó el método gráfico-analítico de la distribución de Gumbell tipo I, que presenta la ventaja de tener un papel funcional de fácil uso. Utilizando el papel funcional de Gumbell tipo I, se grafican los valores de TFS Vs $M'(t)$, y se obtiene una línea recta, la función del algoritmo de Gumbell es:

$$P(TFS \leq t) = e^{-[e^{-a(t-\mu)}]} = M(t) \quad (2.5)$$

Donde:

a: parámetro de forma y es el inverso de la pendiente de la recta.

μ : parámetro de posición, tiempo característico de reparación.

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

Los valores numéricos de $M'(t)$, se calculan de acuerdo con la expresión para rangos medios, si el número total de datos es menor que 50, con la siguiente ecuación.

$$M'(t) = \frac{i-0,3}{n+0,4} * 100 \quad (2.6)$$

Donde:

$M'(t)$: función acumulativa de fallas.

n: número de datos.

i: el número de posición de cada dato ordenado de forma creciente. $i= 1,2,3,\dots,n$.

Para hallar la función de mantenibilidad $M(t)$, toda vez que hemos planteado la recta en el papel funcional debemos hallar los valores de los parámetros **a** y **μ** . Para calcular el valor de “**a**”, trazamos en la escala “**variable reducida**” del papel funcional dos verticales, una por el valor cero (0) y otra por el valor dos (2), hasta tocar la recta, y leemos sus valores en el eje de las ordenadas, así se toma la pendiente

de la curva, el inverso de la pendiente es el valor “**a**”. Para hallar el valor “**μ**”, se traza una vertical con el valor de 37% en la escala Prob ($T \leq t$), hasta tocar la recta, luego leemos el valor correspondiente en el eje de las ordenadas y este sera el valor de “**μ**”. Se llevan estos valores a la función de **M(t)**, dejando la expresión en función de “**t**”.

c) Disponibilidad Inherente (D_i): Es el nivel esperado de disponibilidad debido al comportamiento del mantenimiento correctivo unicamente. Esta determinada por el diseño del equipo. Asume que los repuestos y personal estan 100% disponibles sin retraso alguno. La ecuación para determinar la disponibilidad inherente es la 2.7. [11]

$$D_i = \frac{TPEF}{TPEF + TPPR} \times 100 \quad (2.7)$$

d) Disponibilidad Operacional (D_o): Es el fundamento de la disponibilidad. Este es el valor real de la disponibilidad obtenido en la operación diaria de la planta. Este valor refleja el nivel de recursos del mantenimiento de la planta así como la efectividad organizacional. La ecuación para determinar la disponibilidad operacional es la 2.8. [11]

$$D_o = \frac{TPEF}{TPEF + TPFS} \times 100 \quad (2.8)$$

Donde:

T.P.E.F: Tiempo promedio entre fallas o media de los tiempos de buen funcionamiento.

T.P.F.S: Tiempo promedio fuera de servicio o media de los tiempos en que el equipo no esta operando.

T.P.P.R: Tiempo promedio para reparar o media del tiempo que es usado solo para restaurar el equipo que ha fallado.

En la figura 2.5 se muestra una representación gráfica de los tiempos utilizados para el cálculo de los indicadores de efectividad:

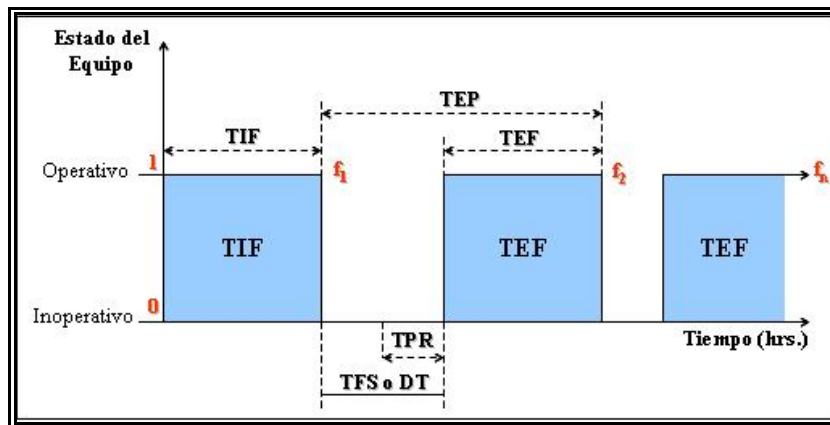


Figura 2. 5. Tiempos Utilizados en el estudio de los Indicadores de Efectividad.

Fuente: Reliability World. (2005)

Donde:

1 = Condición operacional del equipo

0 = Condición de falla

f_1, f_2, \dots, f_n = fallas del equipo

TIF = Tiempo hasta la fallar (usado en equipos no reparables)

TEF o TBF = Tiempo entre fallas

TEP = Tiempo entre paradas

TFS o DT = Tiempo fuera de servicio o tiempo no operativo

TPR = Tiempo necesario para reparar

e) **Tiempo Entre Fallas (TEF):** Es el tiempo que es capaz de operar equipo sin interrupciones dentro del periodo considerado en estudio, el periodo inicia desde

el arranque del equipo hasta la aparición de una falla. En el cálculo de la confiabilidad, este factor es uno de los más utilizados, la data se toma para el tiempo promedio entre fallas – TPEF o MTBF – el cual indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de una falla. Su relación se encuentra en que mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo. Utilizando el método estadístico de la distribución de Weibull, se tiene que el Tiempo Promedio Entre Fallas se puede calcular mediante la ecuación 2.9. [5]

$$TPEF = A\eta + \gamma \quad (2.9)$$

Donde:

TPEF: Tiempo Promedio Entre Falla.

A: Constante numérica que se obtiene de la tabla C.1 (Ver anexo C).

η : Parámetro de escala de la distribución de Weibull.

γ : Parámetro de posición de la distribución de Weibull.

- f) **Tiempo Fuera de Servicio (TFS):** El parámetro de tiempo necesario para el estudio de mantenibilidad es el Tiempo Fuera de Servicio, que se describe como el intervalo de tiempo transcurrido desde que el sistema productivo es desconectado hasta que es entregado de nuevo al equipo de operaciones, listo para cumplir su función. La ecuación para calcular el Tiempo Promedio Fuera de Servicio mediante el método gráfico-analítico de la distribución de Gumbell tipo I es la 2.10 que se muestra a continuación.

$$TPFS = \mu + \frac{0,5778}{a} \quad (2.10)$$

2.2.9. Índice Relativo de Confiabilidad

Es una cifra relativa que depende básicamente de la estimación numérica por parte del personal calificado de un sistema o equipo en particular. En la práctica, la confiabilidad puede apreciarse por el estado que guardan o el comportamiento que tienen cinco factores y que se consideran existen en todo recurso por conservar; estos factores son los siguientes:

1. Inspección visual.
2. Pruebas y mediciones.
3. Edad del equipo.
4. Medio ambiente.
5. Carga de trabajo.

Los diversos estudios del producto se relacionan, vinculan y examinan conjuntamente, para poder determinar la confiabilidad del mismo bajo todas las perspectivas posibles, determinando posibles problemas y poder sugerir correcciones, cambios y/o mejoras en productos o elementos.

2.2.9.1. Inspección Visual

Es importante la inspección visual de una máquina en operación, ya que se pueden descubrir indicaciones valiables acerca del estado de la máquina. Los aspectos a inspeccionarse pueden ser de varios tipos, los principales se mencionan a continuación:

- **De Trabajo:** Cuando lo único que se inspecciona es que el equipo esté realizando bien su función.

- **De Conservación:** Puede ser externo e interno, como por ejemplo: oxido, pintura, estados de cable, polvo y similares.
- **De Fijación:** En general toda la tortillería y elementos de fijación.
- **De Desgaste:** Los aspectos de desgaste se evalúan en todas aquellas piezas que por su trabajo estén sometidas a desgaste, como por ejemplo: cojinetes, ejes, etc.
- **De Calibración:** Los aspectos de calibración pueden ser todos aquellos elementos que para su funcionamiento correcto tengan valores determinados.

2.2.9.2. Pruebas y Mediciones

Las pruebas y mediciones en equipos dan una visión más clara acerca del desempeño mecánico o del estado interno de los mismos. Existe una diversidad de pruebas tales como el análisis de vibraciones, análisis de lubricantes, termografía entre otros. Además de ser un instrumento para verificar el rango de operación normal, también sirven para plantear un valor que sirva como base para estimar la confiabilidad. Las pruebas y mediciones que se utilizaron en esta investigación son las siguientes:

a) Análisis de vibraciones

Es la herramienta principal del mantenimiento predictivo, se basa en que las máquinas tienen un nivel normal de vibración, como resultado de estar dentro de las tolerancias de las especificaciones de fabricación, montaje y operación. Si hay algún parámetro fuera de especificación entonces es una falla que causará el incremento del nivel de vibración, esta puede ser identificada por su comportamiento dinámico (amplitud, frecuencia y ángulo de fase).

b) Análisis de lubricantes

Las técnicas de análisis de lubricantes son fundamentales para determinar el deterioro del lubricante, la entrada de contaminantes y la presencia de partículas de desgaste. Las técnicas de análisis son muy diversas y su utilización depende de la aplicación del aceite. A continuación se detallan las más habituales:

- **Viscosidad cinemática:** Es una medida de la resistencia del aceite a fluir. El cambio de la misma en los aceites usados pone de manifiesto problemas de oxidación, presencia de agua, dilución por combustible, etc.
- **Análisis de metales:** El análisis de metales indica desgaste de componentes, aditivos y/o contaminantes. Los metales de desgaste pueden ser hierro, cobre, plomo, cobalto, etc.
- **Contenido de agua:** La presencia de agua puede indicar problemas vinculados al agua de refrigeración, condensación, etc.

c) Termografía

Es una técnica que permite medir temperaturas exactas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas, se puede convertir la energía radiada en información sobre temperatura.

2.2.9.3. Edad del equipo

Se refiere al envejecimiento de equipo, es decir, a la curva estadística de vida del equipo (curva de la bañera), la cual define de alguna manera que tan confiable es el equipo dependiendo de la etapa de vida en que se encuentre.

2.2.9.4. Medio ambiente

Las condiciones ambientales influyen a través de la temperatura, de gases externos, salinidad y el aire que arrastra partículas que ensucian la carcasa de los equipos produciendo corrosión y oxidación, estos factores disminuyen la vida útil del equipo, dependiendo de las condiciones ambientales a las que estén expuestos.

2.2.9.5. Carga de trabajo

El factor carga de trabajo disminuye la vida útil del equipo influyendo en el desgaste del mismo debido al funcionamiento continuo y al porcentaje de la carga nominal con la que trabaja estando en funcionamiento normal.

2.2.10. Evaluación Técnica

Se basa en un estudio general del equipo para el conocimiento y entendimiento del mismo, tanto de las condiciones de diseño y las condiciones de operación dentro del sistema productivo. Con la evaluación técnica se busca la siguiente información:

- **Funciones que debe cumplir el equipo (Contexto operacional):** Revisar si las condiciones de operación del equipo se encuentra en valores “aceptables” con respecto a las de diseño, durante el tiempo de estudio.
- **Fallas funcionales:** Examinar el equipo en busca de condiciones anormales (ambiente, funcionamiento, entre otras)
- **Modos de falla y causa:** Estudio de las diferentes fallas y como se podrían materializar en el proceso.

- **Efectos de las fallas:** Posibles eventos que podrían desviar el sistema productivo de las condiciones normales de producción.
- **Consecuencias de las fallas:** Implicaciones de las fallas en el proceso productivo donde se encuentra el equipo.
- **Posibles tareas preventivas:** Revisión de las actividades y planes de mantenimiento del equipo en busca de mejorar dichas actividades.
- **Acciones de búsqueda de fallas y soluciones:** Estudio de mejoramiento de los planes de mantenimiento que se le aplica al equipo (Mantenimiento correctivo y preventivo) al igual que sugerir propuestas de mejoras en los procedimientos de las reparaciones.
- **Estudio de Costos:** Considera la rentabilidad económica de las soluciones que se le podrían aplicar al equipo.

2.2.11. Valor Presente Neto (VPN)

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor presente neto del proyecto. Se utiliza el VPN para determinar si una inversión es conveniente o no.

Algunas de las ecuaciones para calcular el valor presente neto se muestran a continuación:

1. Pago simple

$$VPN = -S_0 + \sum_1^n F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (2.11)$$

2. Anualidades iguales

$$VPN = -S_0 + A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \right] \quad (2.12)$$

Donde:

VPN: Valor Presente Neto.

So: Inversión Inicial.

n: Número de periodos de vida del proyecto.

i: Tasa de descuento.

F: Valor o suma de dinero en algún tiempo futuro.

A: Valor equivalente por periodo o valor anual.

El método de valor presente neto (VPN) de evaluación de alternativas es muy popular debido a que los gastos o los ingresos futuros se transforman en dólares equivalentes de ahora. Es decir, todos los flujos futuros de efectivo asociados con una alternativa se convierten en dólares presentes. Cuando se utiliza el método del valor presente neto para comparar varias alternativas, las alternativas deben compararse durante el mismo número de años. Esto es necesario pues, por definición una comparación comprende el cálculo del valor presente neto equivalente de todos los flujos de efectivo futuros para cada alternativa. Cuando las alternativas tienen vidas diferentes, el requerimiento de servicio igual puede satisfacerse mediante dos enfoques:

1. Comparar las alternativas durante un periodo de tiempo igual al mínimo común múltiplo (m.c.m) de sus vidas.
2. Comparar las alternativas utilizando un periodo de estudio de longitud n años, que no necesariamente considera las vidas de las alternativas. Este se denomina el enfoque de horizonte de planeación.

Con frecuencia, los flujos de efectivo de una alternativa representan solamente desembolsos; es decir, no se estiman entradas. Por ejemplo, se podría estar interesado en identificar el proyecto cuyo costo inicial, operacional y de mantenimiento equivalente es el más bajo. Por tanto, aunque las alternativas comprendan solamente desembolsos, o entradas y desembolsos, se aplican las siguientes guías para seleccionar una alternativa utilizando la medida de valor del valor presente neto:

- **Una alternativa:** Si $VPN \geq 0$, la tasa de retorno solicitada es lograda o excedida y la alternativa es financieramente viable.
- **Dos alternativas o más:** Cuando solo puede escogerse una alternativa (las alternativas son mutuamente excluyentes), se debe seleccionar aquella con el valor VPN que sea mayor en términos numéricos, es decir, menos negativo o más positivo, indicando un VPN de costos más bajo o VPN más alto de un flujo de efectivo neto de entradas y desembolsos.

2.2.12. Análisis del Costo del Ciclo de Vida

Es una metodología que estima o pronóstica todos los posibles “flujos de caja” que pudieran ocurrir durante toda la vida útil de un activo, sistema o proceso, incluyendo todas las fases de la vida útil, desde el diseño, procura, construcción, operación, mantenimiento hasta su desincorporación y en la conversión de estos flujos de caja proyectados o futuros, a un valor económicamente comparable

considerando el valor del dinero en el tiempo, tal como el valor presente neto (VPN). La evaluación económica del ciclo de vida debe considerar todos los costos asociados a la vida de un sistema o proceso (directos, indirectos, variables y fijos, probabilísticos y determinísticos) desde el Inicio de Estudio, Anteproyecto, Proyecto, Diseño, Procura, Construcción, Instalación, Operación y Descarte. Durante el desarrollo de un proyecto se requiere conocer cuándo las cosas fallan, cómo las cosas fallan y cómo esas fallas se convierten en dinero o egresos.

Desde el punto de vista financiero, los costos generados a lo largo del ciclo de vida del activo son clasificados en dos tipos (ver figura 2.6):

CAPEX: Costos de capital (diseño, desarrollo, adquisición, instalación, entrenamiento, staff, manuales, documentación, herramientas y facilidades para mantenimiento, repuestos de aseguramiento, desincorporación).

OPEX: Costos operacionales (labor, operaciones, mantenimiento, almacenamiento, contrataciones, penalizaciones).

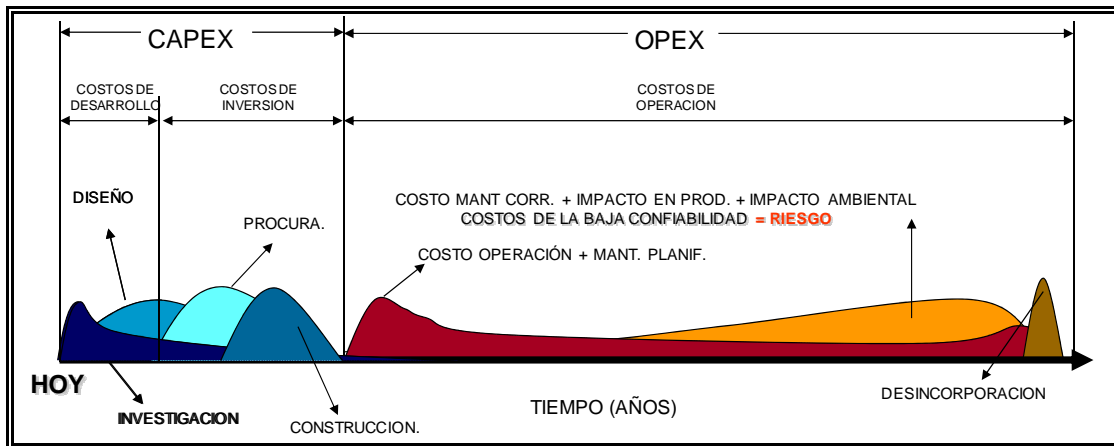


Figura 2.6. Costo del Ciclo de Vida de un equipo.

Fuente: Reliability World. (2005)

2.2.13. Visión General de los Procesos de la Planta Super Octanos C.A.

El producto MTBE es obtenido por la síntesis del isobutileno con el metanol. Este último es suministrado por las empresas vecinas Supermetanol y Metanol de Oriente (Metor), ambas ubicadas dentro del Complejo Petroquímico “Jose A. Anzoátegui”, mientras que el isobutileno es producido en la U-200, por la deshidrogenación del isobutano. El isobutano es suministrado a la planta por el Criogénico de Oriente y también es producido en la U-110/120 por la isomerización del normal-butano.

La planta Super Octanos C.A., consta de cuatro unidades de procesos principales, una de servicios y una de almacenamiento, las cuales se describen a continuación:

Unidad de Isomerización (U-110/120): El proceso de isomerización es una conversión del n-butano a isobutano en un reactor de lecho fijo en fase de vapor, promovido por la inyección de pequeñas cantidades de tetracloruro de carbono.

La reacción se realiza en presencia de hidrogeno, el cual evita la polimerización y la formación de oleofinas. Como productos intermedios de la reacción de isomerización. El proceso se realiza a temperaturas de 160 °C a 180 °C y a presiones de 35 Kg/cm². Esta unidad consiste de dos reactores, calentador de carga, separadores, compresor de gas de reciclo, columna estabilizadora y un equipo para proporcionar el hidrogeno necesario para satisfacer el consumo químico de este.

Unidad de Deshidrogenación (U-200): En esta unidad se lleva a cabo la conversión del isobutano, proveniente de la U-110/120 a isobutileno a través del

proceso deshidrogenación catalítica. Cinco etapas identifican las secciones de esta unidad:

- Sección de Calentamiento: Cuya función es subir la temperatura de alimentación a la planta de 49 °C a 590 °C aproximadamente.
- Sección de Reactores: Convierten el isobutano en isobutileno en presencia de un catalizador de cromo.
- Sección de Compresión: Comprimen el gas al punto de condensarlo y mantienen una presión de vacío en los reactores.
- Sección de recuperación de baja temperatura (LTRS): Recuperan los hidrocarburos de la corriente gaseosa que no se condensa en la sección de compresión y proveen hidrógeno a la unidad de isomerización.
- Sección Depropanizadora: Separa el propano de los isobutanos del isobutileno. La salida de esta unidad contiene un 53 % de isobutileno en peso y su capacidad es 75 toneladas por hora.

Unidad de Síntesis de MTBE (U-300): En esta unidad se produce la reacción entre la corriente de hidrocarburos que contiene el isobutileno, proveniente de la unidad 200, y el metanol para obtener el MTBE.

Unidad de Servicios Industriales (U-700): En esta unidad se produce: agua de enfriamiento, vapor, aire de instrumento, aire de servicio, gas combustible, agua desmineralizada y nitrógeno, necesarios para llevar a cabo los procesos en las demás unidades.

Unidad de Almacenamiento (U-800): En el área de almacenamiento fuera de las unidades se guardan los componentes primarios y productos intermedios y finales, además de estar ubicada una estación de bombeo (Pump House) y una planta de

tratamiento de efluentes. Hay dos recipientes a presión esféricos (uno para Isobutano y otro para Isobutileno), un recipiente a presión cilíndrico para Pentano, dos tanques para Metanol y dos tanques para MTBE.

Unidad de Bombeo (U-900): Se encuentra instalada en el muelle existente en el área del Complejo Criogénico José Antonio Anzoátegui. Posee dos brazos de carga para el MTBE y consta de una red de bombas y tuberías que van desde el almacenaje (U-800) hacia los tanques de exportación.

En la figura 2.7 se representa un esquema de todas las unidades y el orden en que ocurre el proceso de producción de MTBE. Todas las unidades mostradas en la figura 2.7 se subdividen a su vez en diferentes sistemas que realizan tareas específicas de cada proceso. El interés de esta tesis se centró en el sistema de compresión de aire de regeneración, el cual se encuentra ubicado en la unidad de deshidrogenación (U-200).

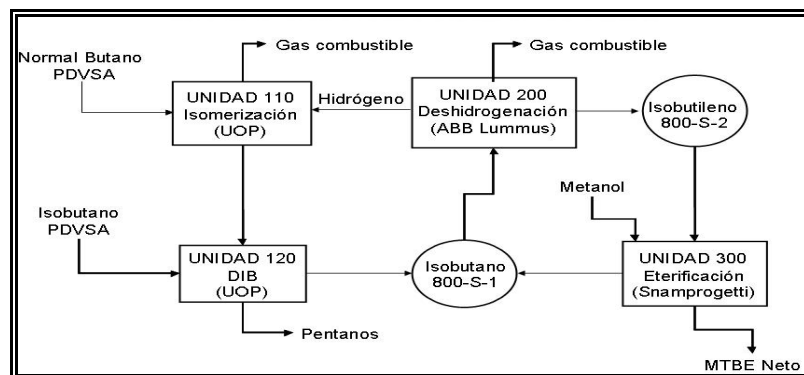


Figura 2. 7. Diagrama de flujo del proceso de producción de MTBE en la planta Super Octanos C.A.

Fuente: Super Octanos C. A.

2.2.14. Sistema de Compresión de Aire

Es un conjunto de equipos organizados y relacionados que interactúan entre si para comprimir aire desde una presión inicial (P_o) hasta una presión final (P_f), donde P_o es menor que P_f . Un sistema de compresión se encuentra conformado por: un motor (eléctrico o de combustión, o turbina a vapor o a gas), un equipo que modifica la velocidad de salida del motor, como una caja multiplicadora o reductora, y un compresor (de cualquier tipo). [12]

En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de un sistema de compresión de aire.

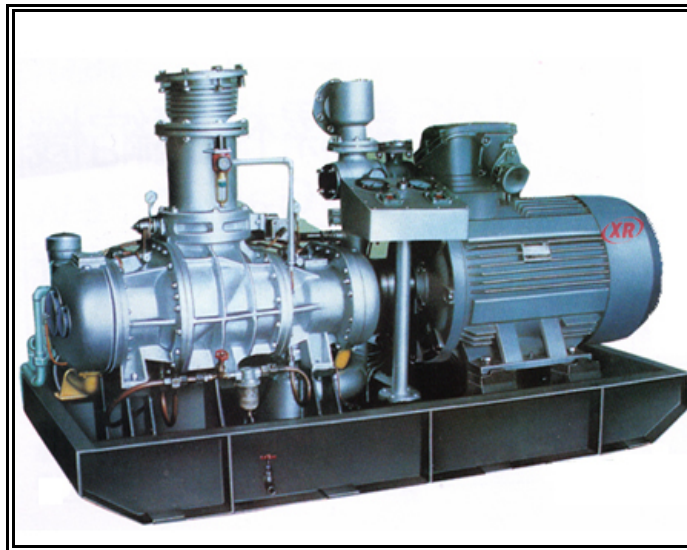


Figura 2. 8. Ejemplo de un Sistema de Compresión de Aire.

Fuente: Hanlon, P. (1996)

2.2.15. Compresor Centrífugo

Es una máquina cuyo elemento principal es un rodete (rotor) a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando este su cantidad de movimiento por

acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido.

El aire entra al compresor cerca de su eje en dirección axial y es impulsado en forma radial por la fuerza centrífuga producida por el movimiento del rodete. El aire que sale radialmente y a gran velocidad del rodete, es tomado por el difusor donde la energía cinética del aire se transforma en energía potencial en forma de presión. El compresor de la planta Super Octanos C.A., es de cinco etapas, el aire entra axialmente por los extremos del compresor, y va pasando por las diferentes etapas hasta el rodete doble, que es el rodete del medio de las cinco etapas en donde llegan las dos corrientes de aire, para salir a la presión final. En la figura 2.9 se muestra un esquema de un compresor centrífugo como el que está en la planta Super Octanos C.A., este diseño de compresor se utiliza para duplicar la capacidad de flujo. [12]

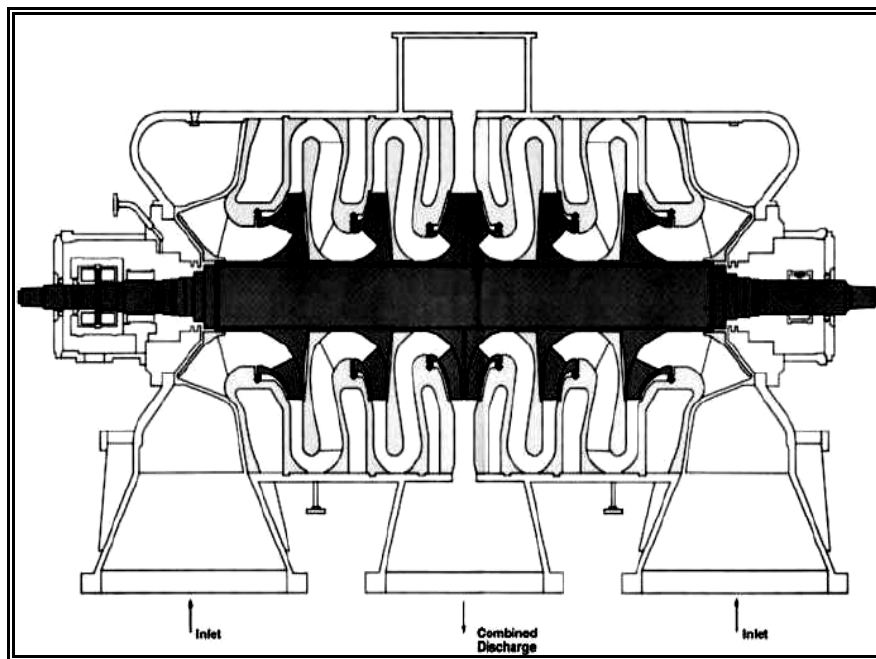


Figura 2. 9. Compresor centrífugo de doble flujo.

Fuente: Hanlon, P. (1996)

2.3. Nociones basicas de los motores eléctricos

2.3.1. Motor Eléctrico

Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. [13]

Son ampliamente utilizados en instalaciones industriales, comerciales y particulares. Pueden funcionar conectados a una red de suministro eléctrico o a baterías. En la figura 2.10 se muestra una imagen de un motor eléctrico donde se señalan sus partes principales.

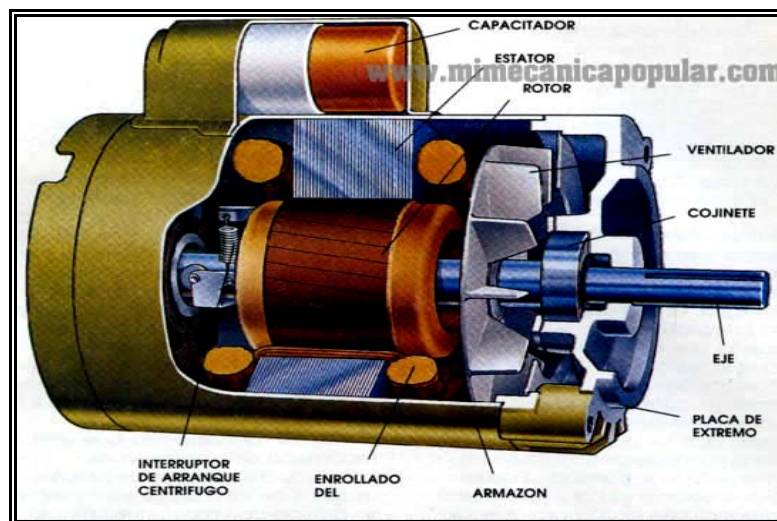


Figura 2. 10. Motor eléctrico donde se indican sus partes principales.

Fuente: www.mimecanicapopular.com.

2.3.2. Clasificación de los Motores Eléctricos

Se clasifican en dos grandes grupos, según el tipo de red eléctrica a la que se encuentren conectados. Así, se tienen:

- Motores eléctricos de corriente alterna.
- Motores eléctricos de corriente continua.

A su vez, en las máquinas de corriente alterna la generación del campo magnético excitador se puede llevar a cabo:

- Mediante corriente alterna, en las máquinas asíncronas.
- Por medio de corriente continua, en las máquinas síncronas.

En los motores asíncronos, desde el punto de vista constructivo, se pueden distinguir dos formas típicas de rotor.

- Rotor de jaula de ardilla.
- Rotor bobinado.

➤ **Motor Eléctrico Asíncrono**

Son aquellos motores eléctricos en los que el rotor nunca llega a girar a la misma frecuencia con la que lo hace el campo magnético del estator, es decir, el rotor no está conectado a fuente alguna de potencia, sino que la recibe por inducción del flujo creado por los arrollamientos dispuestos en el estator, el cual es alimentado por

corrientes mono o polifásicas. Cuanto mayor es el par motor mayor es esta diferencia de frecuencias. [13]

Los motores asíncronos constan de dos partes:

- El estator, es la parte fija de la máquina, constituido por una corona de chapas magnéticas aisladas entre sí por medio de barniz, ranuradas interiormente y sujetas a una carcasa fabricada, por lo general, con fundición de hierro o aluminio. En las ranuras del estator se dispone un devanado, constituido por un número de fases igual al de la red eléctrica que alimenta al motor.
- El rotor, es la parte móvil de la máquina, constituido por una corona de chapas apiladas directamente sobre el eje de la máquina. La corona rotórica presenta una serie de ranuras interiores en las que se encuentra dispuesto el devanado rotórico.

➤ **Motor eléctrico asíncrono de rotor de jaula de ardilla**

En los motores de jaula de ardilla, el devanado del rotor está constituido por barras de cobre o de aluminio colocadas en las ranuras de la corona rotórica y unidas en sus extremos a dos anillos del mismo material. El conjunto de barras y anillos tiene aspecto de jaula de ardilla, de ahí el nombre que recibe este rotor. [13]

El par de arranque de este tipo de motor es relativamente pequeño, y la intensidad absorbida en el arranque es elevada. En la figura 2.11 se muestra un despiece de un motor de tipo jaula de ardilla.

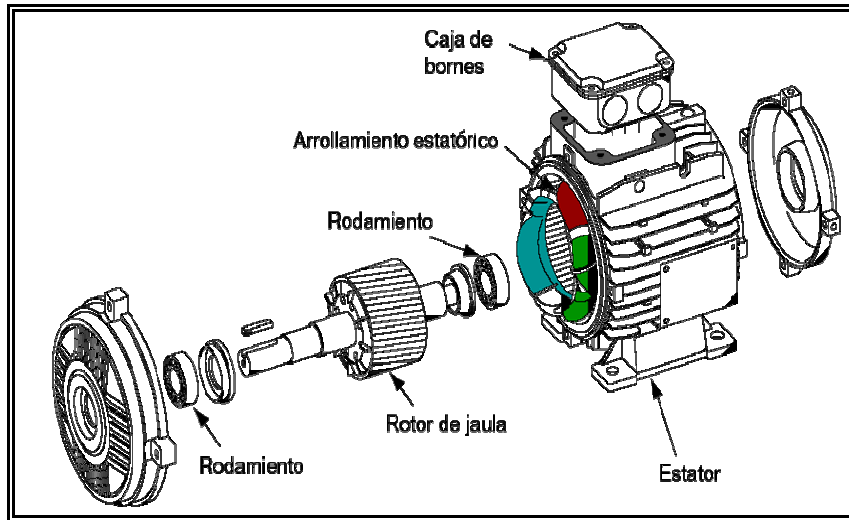


Figura 2. 11. Motor eléctrico tipo jaula de ardilla.

Fuente: Ortega, J. (1996)

➤ Motor eléctrico asíncrono de rotor bobinado

En los motores asíncronos de rotor bobinado, el devanado rotórico, al igual que el estatórico, está constituido por hilos de cobre. En las ranuras de la corona rotórica se alojan, por lo general, tres devanados conectados en un punto común. Los extremos libres pueden estar conectados a tres anillos de cobre (anillos rozantes) que giran solidariamente con el eje. Haciendo contacto con los anillos rozantes, se encuentran unas escobillas, generalmente de grafito, que están fijas respecto al estator y que permiten realizar la conexión de los tres devanados rotóricos con el exterior.

Aunque desde el punto de vista constructivo el motor de rotor bobinado es más complejo y menos robusto que el de jaula de ardilla, se puede lograr un par de arranque aproximadamente 2,5 veces superior al nominal y una corriente de arranque menor que en el caso de rotor de jaula de ardilla. También, mediante el uso de las resistencias, se puede regular la velocidad de giro del motor. [13]

En la figura 2.12 se muestra un despiece de un motor de tipo rotor bobinado.

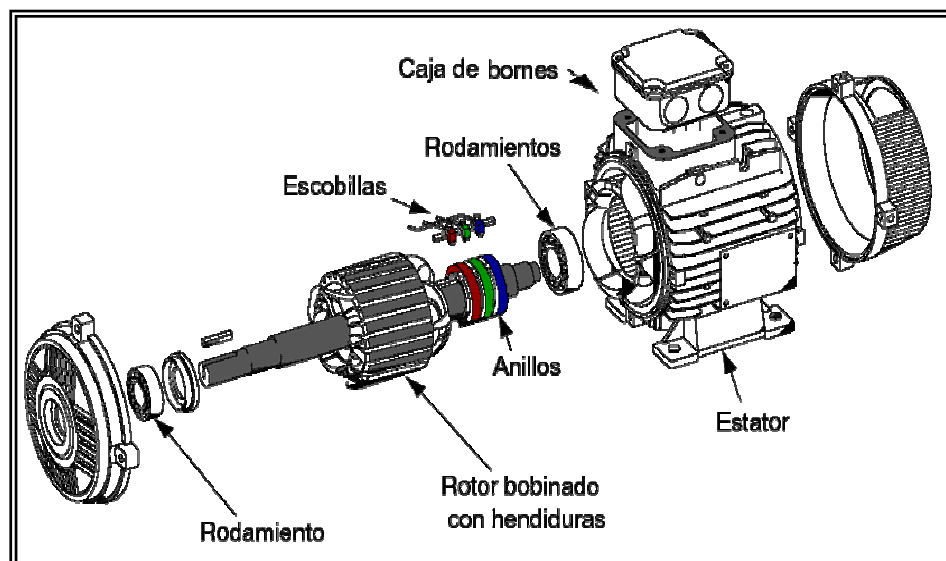


Figura 2. 12. Motor eléctrico de rotor bobinado.

Fuente: Ortega, J. (1996)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se mostrará la metodología utilizada en la investigación, se indica el tipo de investigación y las diferentes técnicas, que se utilizaron a lo largo del desarrollo del mismo.

3.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación titulado “Evaluación técnica del comportamiento operacional basada en indicadores de efectividad del motor de un sistema de compresión de aire” Caso: Motor 200-MK-2 de la planta Super Octanos Jose – Edo – Anzoátegui, se desarrolló bajo una estrategia de *Investigación Documental*, ya que se basó en la revisión de fuentes y documentos bibliográficos, así como también en manuales de especificaciones técnicas del equipo, procedimientos utilizados en éste y consulta de criterios y metodologías de mantenimiento de diversos autores. También esta investigación fué *de campo* ya que trató de un análisis sistemático de problemas en la realidad con el propósito de describirlos, interpretarlos y entender su naturaleza, explicando sus causas y efectos, así como predecir su ocurrencia. Además se trabajó en el ambiente natural en que conviven las personas y las fuentes consultadas, de las que se obtuvieron los datos más relevantes de la investigación.

La investigación, es de nivel *Aplicada* porque su interés está en la aplicación, utilización y consecuencias prácticas del conocimiento, es decir, orientada hacia un objetivo práctico determinado, conducente a la creación de nuevos dispositivos, productos y procedimientos. Además se hicieron propuestas de mejoras de las

condiciones operacionales, empleando bases teóricas de mantenimiento para la resolución de problemas prácticos que se suscitaron en la empresa.

Según el conocimiento, la investigación es de carácter *Descriptiva* ya que el propósito principal de ésta fue describir las situaciones y eventos en el motor; decir cómo fueron y como se manifestaron caracterizando el hecho, fenómeno o situación con el fin de establecer su estructura o comportamiento.

3.2. Técnicas de investigación y análisis

En el desarrollo de este trabajo, se utilizaron distintas técnicas e instrumentos para la recolección de la información y análisis de los datos, relacionados con la operación y diseño del motor, con el propósito de conocer las condiciones operacionales, y de esta manera proponer mejoras en el mantenimiento preventivo en función del incremento de la confiabilidad y disponibilidad del motor 200-MK-2. Entre las técnicas utilizadas en el desarrollo de este trabajo de investigación tenemos las siguientes:

3.2.1. Observación Directa o Inspección Visual

Se llevaron a cabo inspecciones de rutina y monitoreo de condiciones de operación, con el fin de conocer las principales partes del motor y diagnosticar fallas. Como instrumento de recolección de datos se utilizó el colector de data de vibraciones CSI 2130, termómetro infrarrojo tipo pistola FLUKE 66, cámara termográfica IR Flexcam Ti55 y sistemas de monitoreo en tiempo real SISTEM 1 ® y ASPEN PROCESS EXPLORER 2004 ®. 3.2.2. Documentación y Recolección de Data Histórica de Falla

Se utilizó esta técnica para la recolección de la data histórica de fallas del motor, con la finalidad de establecer el comportamiento del equipo en el lapso de tiempo de la investigación.

3.2.2. Recolección de Data Operacional y de Diseño

Esta técnica fue utilizada para el reconocimiento de la información que se encuentra en los manuales de diseño del motor así como en los manuales de operación. Esta información es necesaria para acentuar el conocimiento del diagnóstico de la situación operacional actual soportado en la observación directa.

3.2.3. Entrevistas informales al Personal

Se utilizó esta técnica para obtener distintos puntos de vistas de la investigación, se le realizó al personal de experiencia en el área de mantenimiento y confiabilidad, además permitió conocer en detalles los trabajos realizados al motor, fallas más comunes, así como también las condiciones operacionales de éste. Esta técnica, fue de mucha ayuda durante el desarrollo de la estimación del índice relativo de confiabilidad.

3.2.4. El Diagnóstico

Una vez realizada la observación directa, la recolección de datos operacionales y de diseño, y haber realizado las entrevistas informales al personal calificado, se utilizó la técnica del diagnóstico que permitió hacer una síntesis de esta información e identificar los hechos irregulares en el funcionamiento del motor.

3.2.5. Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF)

Esta técnica facilitó la identificación de las fallas en el motor, utilizándose tablas para sintetizar y recabar toda la información, la cual proporcionó el reconocimiento y la evaluación de los modos de fallas con sus posteriores efectos.

3.2.6. Principio de Pareto

La ejecución de esta herramienta permitió determinar cual de todas las fallas, según el registro estadístico de fallas del motor 200-MK-2, impactaba de mayor manera en el tiempo fuera de servicio del motor.

3.2.7. Análisis Causa Raíz

La aplicación de esta herramienta, permitió la elaboración de un árbol de fallas, donde se determinaron las causas físicas, humanas y latentes, de la falla que más influye en los tiempos fuera de servicio del motor 200-MK-2, permitiendo adoptar acciones correctivas con el fin de minimizarlas.

3.2.8. Estimación de los Indicadores de Efectividad

Para la estimación de los indicadores de efectividad se utilizaron los tiempos fuera de servicio y tiempos entre fallas del motor, el método estadístico de Weibull y programas de computación.

3.2.9. Estimación del Índice Relativo de Confiabilidad

Para la estimación de este índice se evaluarán factores como la inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo, los

cuales fueron calificados tomando en cuenta el criterio y la experiencia del equipo natural de trabajo. La evaluación de cada uno de los factores fue hecha durante reuniones con el ENT.

3.2.10. Manejo de Programas Computación

Con la ayuda de esta herramienta fué posible la organización y presentación de datos así como los resultados (Indicadores de Efectividad), de una manera más práctica, sencilla y ordenada para el mejor entendimiento. Entre los programas de computación utilizados se encuentran: Microsoft Office®, Crystall Ball®, Aspen Process Explorer®, Sistem1®, ThermaCAM QuickReport® y AMS Suite: Machinery Health Analyzer®.

3.3. Población y muestra

La población es el conjunto total de individuos, objetos o medidas que poseen algunas características comunes, observables en un lugar y en un momento determinado. En este caso la población y muestra estuvo representada por el motor 200-MK-2 y los subsistemas de lubricación, de enfriamiento y eléctrico de arranque, necesarios para que dicho motor funcione correctamente.

La población humana también formó parte de la investigación y estuvo representada por el personal encargado de la operación y mantenimiento del motor 200-MK-2, al cual se le realizaron las entrevistas para el mejor conocimiento del equipo. La muestra humana la conformó el equipo natural de trabajo (personal de los departamentos de electricidad, seguridad industrial, confiabilidad, operaciones, planificación y mantenimiento mecánico).

3.4. Etapas de la investigación

3.4.1. Revisión bibliografía:

Búsqueda de información referente a la unidad 200 de deshidrogenación, el proceso que se lleva a cabo en esta unidad y los equipos que lo conforman, haciendo énfasis en el sistema de compresión de aire de regeneración. Alternadamente, se hizo una inducción a la planta, conociendo así las limitaciones para obtener los parámetros operacionales necesarios para realizar el estudio del equipo. Esta etapa se ejecuta durante todo el desarrollo del proyecto ya que constantemente se consulta bibliografía especializada, libros, revistas, tesis realizadas en la Universidad de Oriente, artículos de internet referentes al tema, etc.

3.4.2. Diagnóstico del motor 200-MK-2 en función al contexto operacional:

En esta etapa de la investigación se realizó una inspección al motor 200-MK-2, mediante la técnica de observación directa, a fin de verificar la situación actual de funcionamiento en la que se encuentra, la ubicación física y la función que cumple el motor en el sistema de compresión de aire de regeneración, recolectando datos de las variables operacionales que maneja y comparándolas con las de diseño. Se realizaron entrevistas informales al personal de mantenimiento así como también al departamento de confiabilidad, lográndose el diagnóstico de la situación operacional actual del motor 200-MK-2.



3.4.3. Análisis de Modos y Efectos de Fallas del motor (AMEF) del motor 200-MK-2:

En esta etapa se identificarán las fallas potenciales con el propósito de conocer los modos y los efectos que producen en el motor, para sugerir reemplazos y/o

mejoras en éste, buscando que los distintos modos de fallas sean reducidos. Partiendo del contexto operacional se definió la función para el cual está diseñado, se identificaron las fallas funcionales, las maneras o formas en las que falla y lo que ocurre cuando el equipo falla de esa manera; estos cuatro aspectos son los que forman parte del AMEF y para esta información se dispuso de un formato de recolección de toda la información necesaria y de utilidad para la investigación, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Formato para el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF)

Fuente: Propia

	UNIDAD	SISTEMA	TAG	SUBSISTEMA	
	FACILITADOR	AUTOR	FECHA	HOJA	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL ¿De que forma falla?	MODO DE FALLA ¿Que causa la falla?	EFECTO DE FALLA ¿Que sucede cuando hay falla?	

3.4.4. Análisis Causa-Raíz de la falla recurrente en el motor para la determinación del origen de la falla

La aplicación de esta técnica comenzó con el análisis de Pareto que permitió separar las fallas que más impactan en el tiempo fuera de servicio del motor 200-MK-2, y así establecer un orden de prioridades. Luego se aplicó la herramienta del Análisis Causa Raíz para identificar las causas físicas, humanas y latentes, de la falla que más impacta en el tiempo fuera de servicio del motor 200-MK-2. El estudio se basó en la construcción de un árbol de fallas que permitió el ordenamiento lógico de las posibles fallas que podrían ocurrir y se observó de forma gráfica la relación entre un modo de falla de un sistema en particular y la causa básica que la produce.

3.4.5. Estimación de los Indicadores de Efectividad:

En esta etapa de la investigación se estimaron los indicadores de efectividad del motor, mediante el uso de programas computacionales. El ENT consideró estimar los siguientes indicadores para este trabajo de investigación: Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad. Para la confiabilidad se utilizaron las ecuaciones de la distribución Paramétrica de Weibull y para la mantenibilidad se utilizó la ecuación de la distribución de Gumbell. Para el cálculo de la Disponibilidad, se utilizaron el tiempo promedio entre fallas y el tiempo promedio fuera de servicio. Adicionalmente, el ENT decidió estimar el índice relativo de confiabilidad mediante entrevistas y reuniones para analizar y evaluar los factores de inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo, que formaron parte de dicha estimación.

3.4.6. Evaluación técnica del comportamiento operacional del motor 200-MK-2:

En esta etapa se realizó un análisis general del motor, basado en las condiciones de operación con respecto a las condiciones de diseño, también en algunas pruebas como mediciones de vibración y temperatura. Además se analizó el estado del motor de acuerdo a los resultados de las metodologías utilizadas durante la investigación.

3.4.7. Propuesta de acciones que mejoren el comportamiento operacional del motor 200-MK-2:

En esta etapa se realizó una propuesta de mejoras a los planes de mantenimiento que se le aplican al motor 200-MK-2, también se analizó el reemplazo del motor por una turbina a gas basado en el costo del ciclo de vida.

3.4.8. Redacción y presentación del trabajo de grado:

En esta etapa se realizó la redacción del trabajo de grado, y se perfeccionaron los detalles para ser presentado en el formato requerido.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Contexto operacional del motor 200-mk-2 del sistema de compresión de aire de regeneración de la planta super octanos C.A.

Actualmente la planta Super Octanos C.A., produce aproximadamente 40000 toneladas métricas (TM) mensuales de MTBE, para mantener esta producción es necesario que todos los sistemas y equipos que conforman la planta se mantengan en buen funcionamiento. Uno de estos sistemas es el de compresión de aire de regeneración, el cual está formado por tres equipos; un motor eléctrico, una caja multiplicadora y un compresor centrífugo. El interés de esta investigación se centró en el estudio del motor 200-MK-2, que es un equipo crítico, es decir, funciona en línea para continuar todos los procesos de la planta Super Octanos C.A., su pérdida o parada afecta considerablemente la productividad y las ganancias. En la tabla 4.1 se muestran los equipos principales que conforman el sistema de compresión de aire de regeneración y su designación en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 1. Equipos principales del sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200 con su designación.

Fuente: Super Octanos C.A.

EQUIPO	TAG
Motor eléctrico ANSALDO	200-MK-2
Caja multiplicadora RENK TACKE	200-GK-2
Compresor centrífugo NUOVO PIGNONE	200-K-2

El contexto operacional, permitirá conocer cómo debe funcionar y como está funcionando el motor 200-MK-2 y los subsistemas asociados e identificar desviaciones que puedan ser reparadas y mejoradas. Para definir el contexto operacional del motor 200-MK-2, primero fue necesario delimitar las fronteras de estudio para poder recolectar, fusionar y analizar la información obtenida. La delimitación del volumen de estudio indica los sub-sistemas e interfaces que se estudiaron. Estos subsistemas son: el subsistema de lubricación, el subsistema de enfriamiento y el subsistema eléctrico de arranque.

La figura 4.1 muestra los sub-sistemas que delimitan el estudio del motor 200-MK-2.

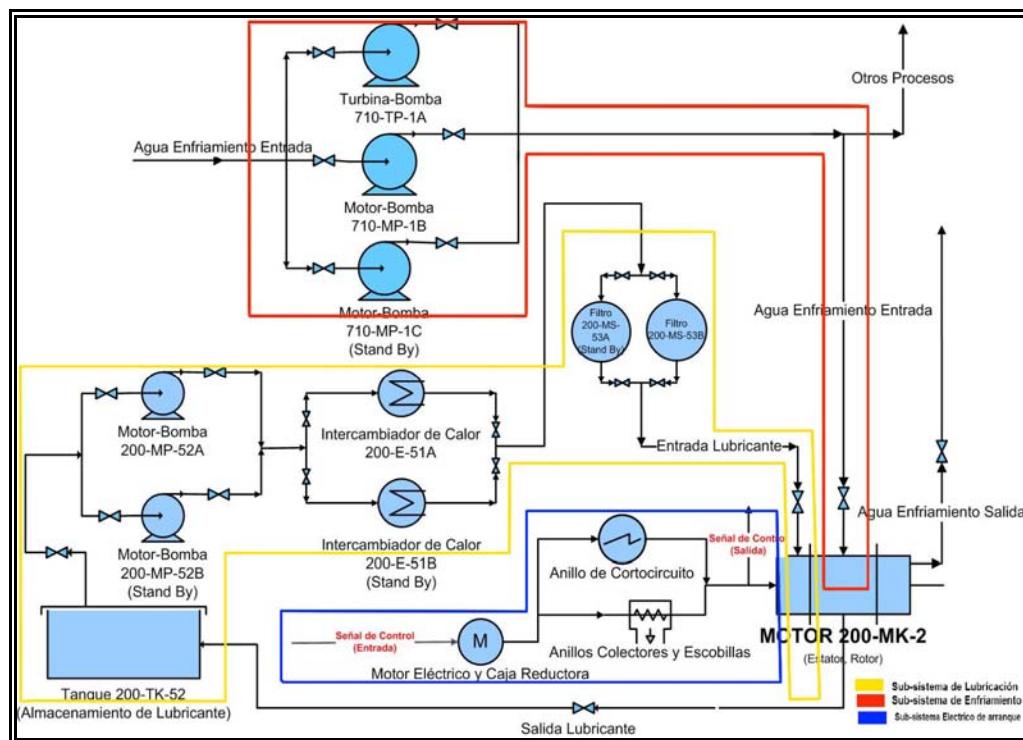


Figura 4. 1. Sub-sistemas que delimitan el estudio del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

Fué preciso incluir una descripción textual que indique con mayor detalle cuales serán los elementos considerados tanto dentro, como fuera de las fronteras. Es por ello que el contexto operacional, se definió a partir del conocimiento de la función del motor 200-MK-2, y de la descripción de los sub-sistemas que intervienen en su funcionamiento. Luego de definir el contexto operacional se realizó un diagnóstico a fin de obtener una visión más amplia de la situación en la que se encuentra el motor 200-MK-2. El diagnóstico de la situación actual se basó en la observación de las condiciones de trabajo, aspectos operacionales y de diseño, y en las variables que deben controlarse para garantizar el buen funcionamiento del motor 200-MK-2.

4.1.1. Conformación Del Equipo Natural De Trabajo (ENT)

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, fue muy importante la conformación de un equipo natural de trabajo, cuya opinión y experiencia fuerón de gran ayuda. La conformación de este equipo, estuvo integrado por personal de la Gerencia Técnica y de los Departamentos de Confiabilidad, Electricidad e Higiene y Seguridad Industrial además del personal de operaciones, planificación, mantenimiento mecánico, y un facilitador general, conocedor de las metodologías a ser empleadas. En conjunto con el ENT se realizaron reuniones periódicas para discutir ideas, propuestas y estrategias para obtener mejoras operativas y de mantenimiento del motor 200-MK-2.

En la tabla 4.2 se nombran los miembros principales de este equipo de trabajo:

Tabla 4. 2. Equipo natural de trabajo para el estudio del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

NOMBRE	CARGO	ENT
Pedro Navas	Ingeniero Electricista	Gerencia de Mantenimiento
Luís Mesones	Técnico Electricista	
Ismael Villarroel	Técnico Mecánico	
José Lira	Planificador	Planificación
Greylangel Mongua	Operador de Planta	Gerencia de Operaciones
Cesar Cabrera	Ingeniero de Procesos	Gerencia de Servicios Técnicos
Berto Serrano	Inspector SHIAO	SHIAO
Pablo Martínez	Ingeniero en Confiabilidad	Departamento de Confiabilidad
Luís Ramos	Técnico en Confiabilidad	
José Tayupo	Pasante	Facilitador General

4.1.2. Diagnóstico de la Situación Actual del Motor 200-MK-2 del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración.

El motor 200-MK-2, es el elemento motriz principal del sistema de compresión de aire de regeneración, cuya función es proporcionar la potencia de eje, necesaria al compresor 200-K-2 para succionar aproximadamente 395 toneladas métricas por hora (TM/h) de aire de la atmósfera y así mantener la continuidad del proceso de producción de MTBE, pero a manera de aumentar dicha producción el registro actual

es de 471 TM/h de aire. Esta diferencia es debido a que este sistema, así como otros sistemas de la planta se le han ido aumentando la carga para superar las condiciones de diseño, con lo cual se incrementa la producción y se reducen los requerimientos de otros productos necesarios para la producción del MTBE, con los consecuentes beneficios en el área económica. El 200-MK-2 es un motor eléctrico, asíncrono de rotor bobinado, el cual usa una resistencia rotórica (reóstato) para el arranque, que luego de alcanzar la velocidad nominal se cortocircuita mecánicamente mediante un colector de tipo anillo (anillo de cortocircuito), funcionando después como un típico motor jaula de ardilla. El motor es trifásico con sistema de enfriamiento por agua. Está equipado con cojinetes de superficie plana y con un sistema de circulación forzada de aceite. En la tabla 4.3 se observan los parámetros de diseño de dicho motor y en la figura 4.2 se muestra el motor 200-MK-2 en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 3. Especificaciones técnicas del motor eléctrico 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

PARÁMETRO	MAGNITUD
MARCA	ANSALDO
POTENCIA ENTREGADA	11.000,0 KW
VOLTAJE	13.200,0 V \pm 5 %
INTENSIDAD DE CORRIENTE	565,0 A
TORQUE	6.480,0 Kg*M ²
VELOCIDAD DE GIRO	1.795,0 rpm
PESO TOTAL DEL MOTOR	37.200,0 Kg
PESO DEL ROTOR	11.590,0 Kg



Figura 4. 2. Vista del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C. A.

Para que el motor 200-MK-2 tenga un buen funcionamiento, es necesario que los diferentes sub-sistemas que lo conforman se encuentren también en buenas condiciones operativas. Estos sub-sistemas son:

1. El sub-sistema de lubricación.
2. El sub-sistema de enfriamiento.
3. El sub-sistema eléctrico de arranque.

En la tabla 4.4, se nombran los equipos a estudiar dentro de cada subsistema.

Tabla 4. 4. Equipos a estudiar dentro de cada subsistema que conforma el motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

SUB-SISTEMA	EQUIPO	CANTIDAD	TAG
LUBRICACIÓN	Tanque	1	200-TK-52
	Motor-Bomba	2	200-MP-52-A 200-MP-52-B
	Intercambiador de Calor	2	200-E-51-A 200-E-51-B
	Filtros	2	200-MS-53-A 200-MS-53-B
	Cojinetes del motor 200-MK-2	2	No tiene
ENFRIAMIENTO	Bombas Centrifugas	3	710-TP-1A 710-MP-1B 710-MP-1C
	Intercambiador de calor dentro del motor 200-MK-2	1	No tiene
ELÉCTRICO DE ARRANQUE	Motor eléctrico y caja reductora	1	No tiene
	Anillos colectores y escobillas	1	No tiene
	Anillo de cortocircuito	1	No tiene
TOTAL DE EQUIPOS		16	

A continuación se presenta el diagnóstico de cada uno de estos sub-sistemas y sus equipos:

4.1.2.1. Sub-Sistema de Lubricación

El sub-sistema de lubricación, es del tipo a “presión forzada”, su función es la de remover el calor causado por las superficies de contacto de los cojinetes y reducir el desgaste entre estas, además de amortiguar el efecto de las cargas sobre los cojinetes durante la transmisión de potencia.

En la figura 4.3, se puede observar un esquema del subsistema de lubricación donde se muestra cada uno de sus equipos.

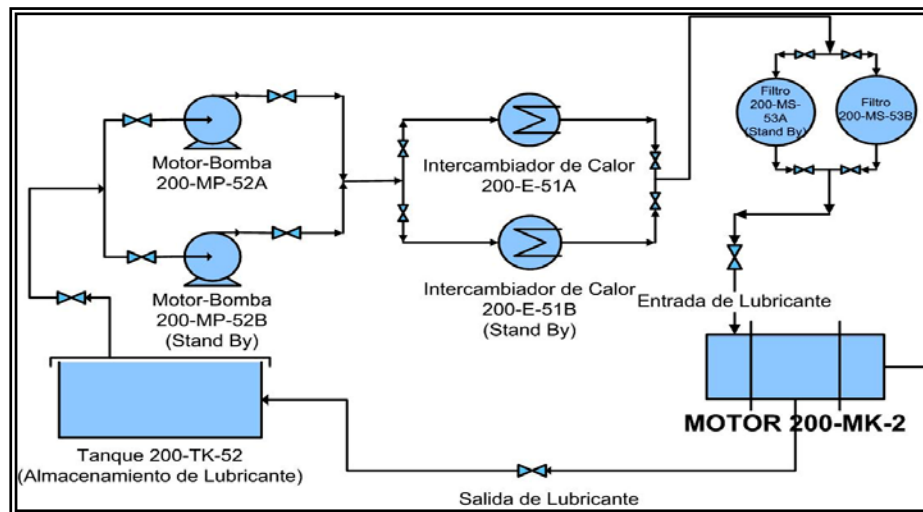


Figura 4. 3. Esquema del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ Tanque (200-TK-52)

El tanque, identificado en la planta como 200-TK-52, tiene como función almacenar el aceite que se utiliza para la lubricación del motor 200-MK-2, tiene una capacidad de almacenamiento de 10482 litros (Lts) de aceite lubricante a presión atmosférica. El tipo de aceite utilizado para la lubricación es TurboLub ISO 46. Actualmente está en buen estado, solo que algunas partes tienen desgaste en la

pintura y suciedad. En la tabla 4.5 se muestran las especificaciones técnicas del tanque 200-TK-52, y en la figura 4.4 se observa una fotografía del tanque en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 5. Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de lubricante.

Fuente: Super Octanos C.A.

EQUIPO	Tanque de almacenamiento de lubricante
TAG	200-TK-52
DIMENSIONES [m] (LARGO X ANCHO X ALTURA)	4,5 x 2,5 x 1,2
CAPACIDAD [Lts]	10.482
MATERIAL	Acero al carbón



Figura 4. 4. Tanque del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ Unidades de Bombeo (200-MP-52A y B)

El sistema de bombeo, consta de dos unidades motor-bomba (una unidad en “espera”), con bombas de tipo tornillo. Su función es la de impulsar el aceite de lubricación hasta los cojinetes del motor 200-MK-2. Los motores funcionan correctamente, solo que tienen corrosión en la carcasa y falta de pintura. En la tabla 4.6 se muestran las especificaciones de diseño y operacionales de los equipos,

motores y bombas, y en la figura 4.5 se observa una fotografía de los motores, las bombas no se observan ya que están dentro del tanque.

Tabla 4. 6. Parámetros operacionales y de diseño de los equipos de la unidad de bombeo de aceite.

Fuente: Super Octanos C.A.

EQUIPO	TAG	POTENCIA [KW]	VOLTAJE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE [A]	
				DISEÑO	OPERACIONAL
Motor Eléctrico	200-MP-52 A 200-MP-52 B	37	460	58,5	30
EQUIPO	TAG	VELOCIDAD [rpm]	CAUDAL [Lts/min]	PRESIÓN [Kg/cm ²]	
				DESCARGA	
				DISEÑO	OPERACIONAL
Bomba de Tornillo	200-P-52 A 200-P-52 B	1765	40	0,2	0,2



Figura 4. 5. Motores de las unidades de bombeo del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ Intercambiadores de Calor (200-E-51A y B)

Los intercambiadores de calor, son del tipo “armazón y conducto”, marca Nuovo Pignone, son dos intercambiadores con las mismas características donde uno se mantiene en “espera” o stand by, y tienen la función de mantener la temperatura

del aceite de entrada a los cojinetes del motor 200-MK-2 a un valor inferior a 45 °C. Estos intercambiadores operan correctamente, solo se observa desgaste en la pintura. En la tabla 4.7 se muestran las características de diseño y operaciones de los intercambiadores de calor, y en la figura 4.6 se observa una fotografía de los intercambiadores en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 7. Especificaciones técnicas de los enfriadores del subsistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

EQUIPO		Intercambiador de Calor	
TAG		200-E-51 A / 200-E-51 B	
DIMENSIONES (DIÁMETRO X LONGITUD) [mm]		434 x 3605	
CANTIDAD DE TUBOS X DIÁMETRO X LONGITUD [mm]		287 x 19 x 3048	
CAÍDA DE PRESIÓN [Kg/cm ²]		DISEÑO	5,1
		OPERACIONAL	4,5
TEMPERATURA [°C]	ENTRADA FLUIDO CALIENTE (ACEITE)	DISEÑO	≈ 60
		OPERACIONAL	56
	SALIDA FLUIDO CALIENTE (ACEITE)	DISEÑO	45
		OPERACIONAL	38



Figura 4. 6. Intercambiadores de Calor del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ **Filtros de aceite tipo Duplex (200-MS- 53A y B)**

Son dos dispositivos colocados en el sistema de lubricación, que recogen las impurezas que están en suspensión en el aceite, atrapándolos y manteniéndolos fuera del sistema de lubricación, donde uno de encuentra en “espera o stand by”. Los filtros funcionan correctamente, solo se observa corrosión y desgaste en la pintura. Las especificaciones técnicas de los filtros usados en el sub-sistema de lubricación del motor 200-MK-2 se muestran en la tabla 4.8 y en la figura 4.7 se muestra una fotografía de los filtros en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 8. Especificaciones técnicas de los filtros de aceite tipo Duplex del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

EQUIPO	Filtros de aceite
TAG	200-MS- 53A /200-MS- 53 B
MARCA	Murisengo
DIÁMETRO DE CONEXIÓN (PULGADAS)	3
CAUDAL (Lts/min)	40
PRESIÓN DE TRABAJO (Bar)	10
TELA FILTRANTE (mm)	25



Figura 4. 7. Filtros del sub-sistema de lubricación.

Fuente: Super Octanos C.A.

Para el correcto funcionamiento del sub-sistema de lubricación se requieren de un conjunto de válvulas que garanticen el flujo de aceite por el filtro en situaciones de saturación, permitiendo que el aceite continúe pasando por el sub-sistema sin haber filtrado, impidiendo que el motor sufra daños. En total son diez válvulas de tipo compuerta, dos válvulas de seguridad y tres válvulas check, todas trabajando a una presión de 150 psi. Las válvulas del sub-sistema de lubricación se encuentran en buen estado y funcionan correctamente.

➤ **Cojinetes del motor 200-MK-2**

Debido a que los cojinetes del motor 200-MK-2 desempeñan un papel muy importante en el funcionamiento de este y debido a que no se adaptaba a ninguno de los subsistemas el ENT decidió incluirlo como un equipo más dentro del subsistema de lubricación. El motor 200-MK-2, está provisto de dos (2) cojinetes de superficie plana, que son lubricados con aceite que es forzado a circular a través de ellos, el sub-sistema de lubricación tiene como fin lubricar estos cojinetes. La superficie del cojinete es de babbit (estaño y plomo) y viene provisto de sellos de laberinto instalados en cada lado de los cojinetes garantizando que el aceite no se arrastre por el eje. Estos cojinetes se encuentran en buen estado operativo. En la tabla 4.9 se muestran las características de diseño y operacionales de los cojinetes, y en la figura 4.8 se observa una fotografía de los cojinetes.

Tabla 4. 9. Especificaciones técnicas de los cojinetes del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

TIPO DE COJINETE		Superficie plana, de Babbit (Estaño y Plomo)			
MEDIDAS	Diámetro Interno [pulgadas]	Diámetro Externo [pulgadas]	Longitud [pulgada]	Espesor [pulgadas]	
	7	8	12	1/8	
ESPACIO DIAMETRAL ENTRE EL DIÁMETRO DEL EJE Y EL DIÁMETRO INTERNO DEL COJINETE. VALOR MEDIO DE DISEÑO [mm]		0,38			
FLUJO DE ACEITE POR CADA COJINETE [Lts/min]		18			
TIPO DE LUBRICACIÓN		Aceite TurboLub ISO 46, a presión forzada			
TEMPERATURA DEL LUBRICANTE DE ENTRADA AL COJINETE [°C]	DISEÑO	50			
	OPERACIONAL	37			
TEMPERATURA DE TRABAJO DE LOS COJINETES [°C]	DISEÑO	85			
	OPERACIONAL	73			



Figura 4. 8. Cojinetes de Babbit.

Fuente: Super Octanos C.A.

En la figura 4.9 se muestra una imagen del sub-sistema de lubricación en la planta Super Octanos C.A.

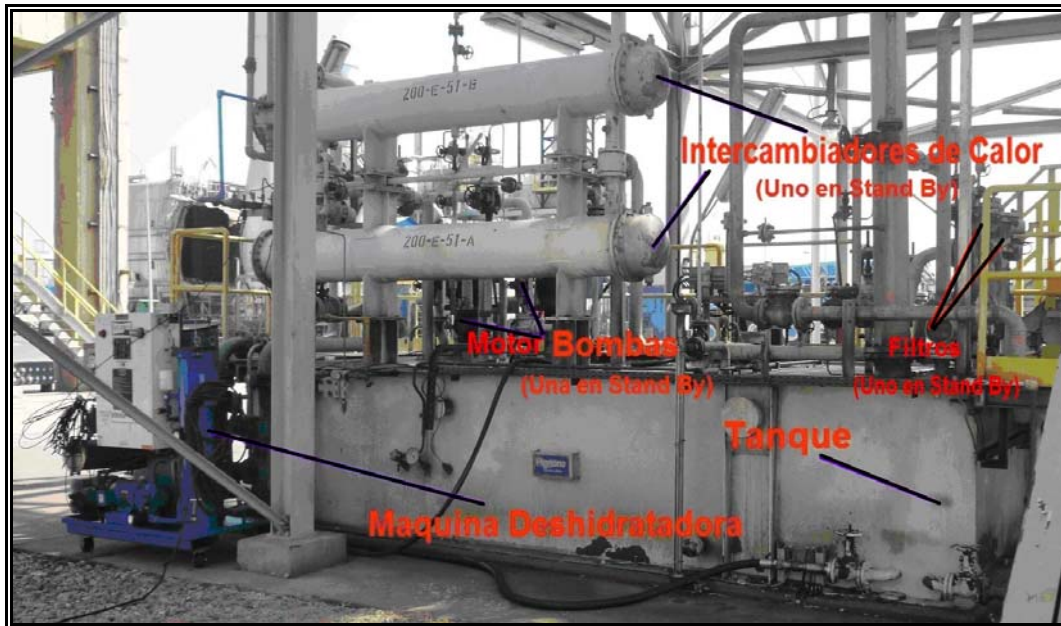


Figura 4. 9. Sub-sistema de lubricación en planta.

Fuente: Super Octanos C.A.

4.1.2.2. Sub-Sistema de Enfriamiento

Las partes activas internas del motor (rotor, estator) calientan el aire a su alrededor hasta 45 °C aproximadamente, el sub-sistema de enfriamiento por agua, es el encargado de controlar la temperatura del aire dentro del motor absorbiendo calor para mantener la temperatura en 35 °C aproximadamente. Este sub-sistema está constituido por tres unidades de bombeo, una unidad en espera, que impulsan 7000 m³/h de agua a todos los sistemas de enfriamiento de la planta, de los cuales 90 m³/h van hacia el intercambiador de calor de tubos con aletas que está dentro del motor 200-MK-2. En la figura 4.10, se puede observar un esquema del sub-sistema de enfriamiento y sus componentes.

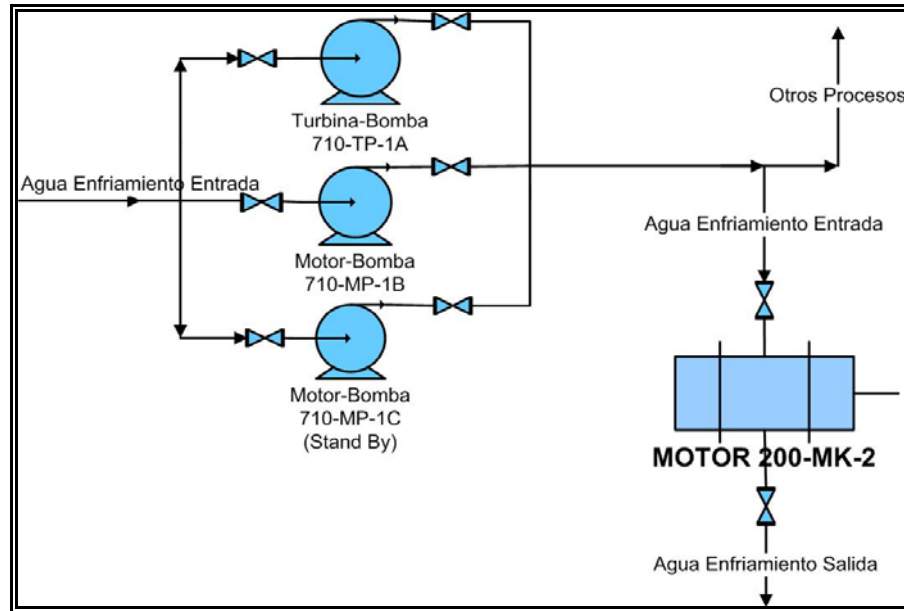


Figura 4. 10. Esquema del sub-sistema de enfriamiento.

Fuente: Super Octanos C.A.

A continuación se presenta el diagnóstico de cada uno de los equipos del subsistema de enfriamiento que se muestran en la figura 4.10.

➤ **Unidades de Bombeo (710-TP-1A, 710-MP- 1B y 710-MP-1C)**

El subsistema de enfriamiento consta de tres (3) unidades de bombeo, una unidad turbina-bomba (la turbina es tipo curtis) y dos unidades motor-bomba, que impulsan aproximadamente 7000 m³/h de agua. Las unidades se encuentran dos operando y una en espera, estas impulsan agua de enfriamiento hasta el intercambiador de calor que viene incorporado al motor 200-MK-2. Estos equipos operan de manera satisfactoria, no presentando fallas. Solo se observan algunos puntos aislados de corrosión y falta de pintura en las carcasas de las bombas.

Los parámetros operacionales y de diseño de las unidades se muestran en las tablas 4.10 y 4.11, y en las figuras 4.11 y 4.12 se muestran imágenes de las unidades en la planta Super Octanos C.A

Tabla 4. 10. Parámetros operacionales y de diseño de los equipos del sub-sistema de enfriamiento.

Fuente: Super Octanos C.A.

Equipo	TAG	Potencia [KW]	Velocidad [rpm]	Voltaje [V]	Intensidad de Corriente [A]			
					Diseño	Operacional		
Motor Eléctrico	710-MP-1B 710-MP-1C	1400	593	4160	265	255		
Equipo	TAG	Velocidad de diseño [rpm]	Caudal de diseño [m ³ /h]	Potencia de diseño [KW]	Presión [Kg/cm ²]			
					Succión		Descarga	
					Diseño	Operacional	Diseño	Operacional
Bomba Centrifuga	710-P-1A 710-P-1B 710-P-1C	585	7000	1260	1	0,8	6	5,3

Tabla 4. 11. Parámetros operacionales y de diseño de la turbina a vapor tipo Curtis del sub-sistema de enfriamiento.

Fuente: Super Octanos C.A.

TURBINA A VAPOR TERMOMECCANICA 705 WK							
EQUIPO	TAG	POTENCIA SALIDA [KW]	VELOCIDAD [rpm]	PRESIÓN ENTRADA [Kg/cm ²]		TEMP.ENTRADA [°C]	
				DISEÑO	OPERACIONAL	DISEÑO	OPERACIONAL
Turbina a Vapor	710-TP-1A	1304	4000	43	42	420	430



Figura 4. 11. Unidades de bombeo 710-MP-1B y 1C del sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.



Figura 4. 12. Unidad de bombeo 710-TP-1A del sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ Intercambiador de Calor

El motor, viene provisto de un circuito cerrado interno de ventilación. El aire que es calentado por las partes activas del motor se distribuye a través del intercambiador de calor de tubos con aletas, con el cual el flujo de agua lo enfría. El equipo opera satisfactoriamente, observándose solo algunos puntos aislados de corrosión en las tuberías de entrada y salida del agua de enfriamiento. En la tabla 4.12 se comparan los parámetros operacionales con los de diseño del sub-sistema de enfriamiento, y en la figura 4.13 se muestran imágenes del sub-sistema de enfriamiento en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 12. Parámetros operacionales y de diseño del sub-sistema de enfriamiento por agua del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

PARÁMETRO	OPERACIONAL			DISEÑO		
	°C	Kg/cm ²	m ³ /h	°C	Kg/cm ²	m ³ /h
Temperatura Entrada Agua de Enfriamiento	34,0			35,0		
Temperatura Salida Agua de Enfriamiento	38,0			39,0		
Presión Entrada Agua de Enfriamiento		4,5			5,0	
Caída de Presión		0,3			0,4	
Flujo de Agua			85,0			88,2



Figura 4. 13. Sub-sistema de enfriamiento del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

4.1.2.3. Sub-Sistema Eléctrico de Arranque

El sub-sistema eléctrico de arranque, está constituido por un conjunto de dispositivos cuya función es canalizar y controlar la energía eléctrica para el arranque y correcto funcionamiento del motor 200-MK-2. El ENT decidió estudiar este sub-sistema delimitando con una frontera los equipos en estudio, como se muestra en la figura 4.14, ya que lo correspondiente a los circuitos de control, además del rotor y estator del motor 200-MK-2, consta más que todo de relés, reóstatos, contactores, y una serie de circuitos eléctricos y electrónicos cuya frecuencia de falla es muy larga, y por otro lado, no están relacionados con la parte mecánica del subsistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Casi todos los equipos de este sub-sistema, excepto por el motor eléctrico y la caja reductora, se encuentran dentro del motor. En la figura 4.14 se muestra un esquema del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2 y sus equipos.

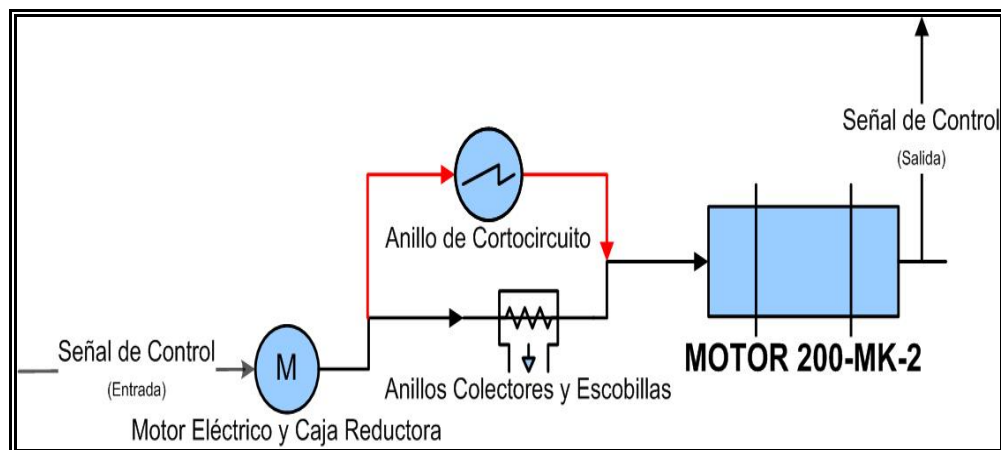


Figura 4. 14. Esquema del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

A continuación se presenta el diagnóstico cada uno de los equipos del subsistema eléctrico de arranque que se muestran en la figura 4.14.

➤ **Motor eléctrico y caja reductora**

El subsistema eléctrico de arranque, consta de un motor eléctrico y una caja reductora, que constituyen junto con un tornillo sin fin, el mecanismo que mueve a las escobillas para que hagan contacto con los anillos colectores durante el arranque del motor. Una vez que el motor ha arrancado y alcanzado su velocidad nominal, ese mismo mecanismo desacopla las escobillas y acciona al anillo de cortocircuito. Este subsistema se encuentra en buenas condiciones físicas y de funcionamiento. En la tabla 4.13 se muestran las especificaciones técnicas del motor eléctrico y caja reductora, y en la figura 4.15 se observa una fotografía de los mismos.

Tabla 4. 13. Especificaciones técnicas del motor eléctrico y caja reductora del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

MOTOR ELÉCTRICO	
MARCA	MGM motori elettrici S.p.A
POTENCIA [KW]	0,65
VOLTAJE [V]	254
CORRIENTE [A]	3
VELOCIDAD [rpm]	1720
CAJA REDUCTORA	
MARCA	ROSSI MOTORIDUTTORI S.p.A
POTENCIA DE ENTRADA [KW]	0,66
POTENCIA DE SALIDA [KW]	0,45
VELOCIDAD DE SALIDA [rpm]	16,6
TORQUE DE SALIDA [DAN*M]	25,9



Figura 4. 15. Motor eléctrico y caja reductora del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ Anillos Colectores y Escobillas

Los anillos colectores y escobillas, son dispositivos electromecánicos que permiten la transmisión de corriente entre la red eléctrica y el rotor del motor 200-MK-2. Son tres anillos colectores y tres escobillas de características similares, debido a que el motor es trifásico. La conexión entre el rotor bobinado y los anillos colectores se realiza a través de tres barras de cobre aisladas insertadas en un agujero del eje en el lado libre del motor. Tanto el conjunto de escobillas y el mecanismo de cortocircuito son automáticamente operadas por el motor eléctrico y la caja reductora de tornillo sin fin. El sistema es totalmente controlado a través de las funciones de arranque de un reóstato. Este anillo colector no ha presentado fallas en los últimos años y actualmente se encuentra en buen funcionamiento. En la tabla 4.14 se muestran las especificaciones técnicas de las escobillas y anillos colectores, y en la figura 4.16 se observa una fotografía de los mismos.

Tabla 4. 14. Especificaciones técnicas de las escobillas y anillos colectores del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

	ESCOBILLAS		ANILLOS COLECTORES
MATERIAL	Carbón	MATERIAL	Bronce-acero inoxidable
DIMENSIONES LARGO X ANCHO X PROFUNDIDAD [mm]	38 x22 x25	DIMENSIONES DIÁMETRO EXTERNO X ANCHO [mm]	220 x 25
TEMPERATURA DE DISEÑO/TEMPERATURA DE OPERACIÓN [°C]	70/63	TEMPERATURA DE DISEÑO/TEMPERATURA DE OPERACIÓN [°C]	70/63
PRESIÓN DE TRABAJO [g/cm²]	180-250		

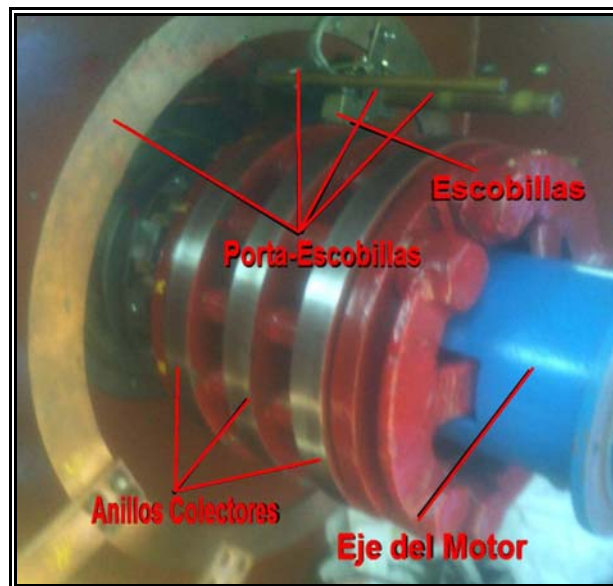


Figura 4. 16. Anillos Colectores del motor 200-MK-2

Fuente: Super Octanos C.A.

➤ **Anillo de Cortocircuito**

Una vez que el motor arranca, se cortocircuita mediante un anillo, este se desliza sobre el eje del motor 200-MK-2 y es accionado mecánicamente por el motor eléctrico y la caja reductora. El anillo de cortocircuito, posee ocho grupos de seis superficies planas cada uno (pequeñas laminas de aleación de cobre superpuestas) que entran en contacto con ocho superficies cilíndricas, es decir, barras cilíndricas de aleación de cobre que salen del anillo colector, para cortocircuitarse. Una vez que el anillo entra en cortocircuito, sigue en funcionamiento hasta que el motor se detiene por cualquier causa, este anillo según el ENT es muy sensible a las vibraciones o cambios en el voltaje o corriente. Este componente es el que más fallas ha presentado en el motor 200-MK-2, según el registro de fallas, siendo de esta manera la principal causa de las paradas imprevistas de este equipo. En la tabla 4.15 se observan las especificaciones técnicas de los contactos del anillo de cortocircuito y en la figura 4.17 se muestra una imagen del anillo de cortocircuito.

Tabla 4. 15. Especificaciones técnicas de los contactos planos y cilíndricos del sub-sistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

	CONTACTOS PLANOS			CONTACTOS CILÍNDRICOS
MATERIAL	Aleación de Cobre		MATERIAL	Aleación de Cobre
TEMPERATURA DE DISEÑO/TEMPERATURA DE OPERACIÓN [°C]	200/80		TEMPERATURA DE DISEÑO/TEMPERATURA DE OPERACIÓN [°C]	200/80
DIMENSIONES LARGO X ANCHO [mm]	1.- 35x25 2.- 36x25 3.- 37x25	4.- 38x25 5.- 39x25 6.- 40x25	DIMENSIONES DIÁMETRO X LARGO [mm]	30 x 350
ESPESOR [mm]	1,5			

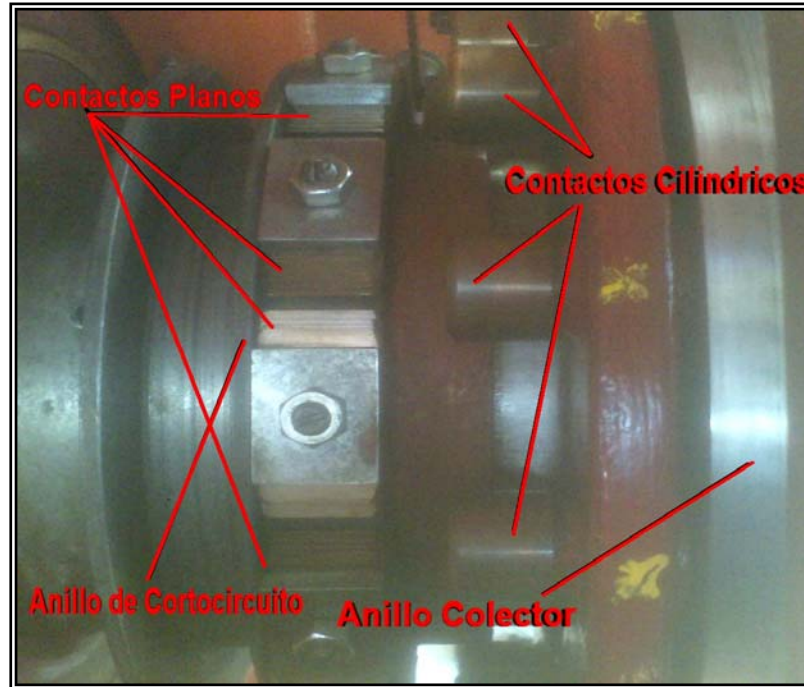


Figura 4. 17. Anillo de Cortocircuito.

Fuente: Super Octanos C.A.

4.1.3. Resumen de la Situación Actual del Motor 200-MK-2 en función al Contexto Operacional.

El motor 200-MK-2, fue seleccionado para operar en el sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200 y suministrar la potencia necesaria para que el compresor succione aire de la atmósfera a razón de 395 TM/h, pero el registro actual es de 471 TM/h. Esta diferencia es debido a que este sistema, así como otros sistemas de la planta se le ha ido aumentando la carga para superar las condiciones de diseño, con lo cual se incrementa la producción y se reducen los requerimientos de otros productos necesarios para la producción del MTBE, con los consecuentes beneficios en el área económica, operacional y de planificación. El motor 200-MK-2 opera expuesto a un ambiente de salinidad, por la cercanía al mar de la planta Super Octanos C.A., también está expuesto a los gases generados por la misma planta y a la

temperatura ambiental. Además, no tiene protección contra los rayos solares y la lluvia.

La empresa Super Octanos C.A., cuenta con un sistema de monitoreo continuo de variables de proceso, es decir, una red de computadoras que están conectadas directamente al proceso. En la figura 4.18 se muestra el valor de la carga, movida por el motor 200-MK-2 en el sistema de compresión de aire de regeneración, tomado con el programa de monitoreo de variables de proceso Aspen Process Explorer ® 2004.2, para un día determinado del periodo en estudio. Las variables de proceso son: temperatura a la entrada y salida del compresor, presión a la entrada y salida del compresor y caudal que circula por el compresor.

Por otro lado, el software SISTEM 1 ® monitorea, continuamente en el tiempo, la velocidad de giro, la temperatura y el amperaje consumido por el motor 200-MK-2. En la figura 4.19 se observan los valores de temperatura, velocidad de giro y el amperaje consumido por el motor 200-MK-2.

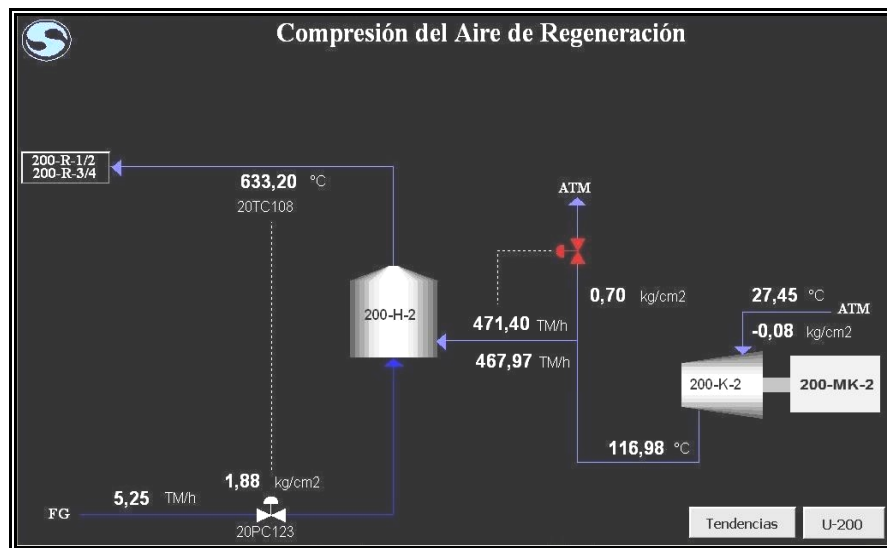


Figura 4. 18. Valores de las variables de proceso tomadas en tiempo real.

Fuente: Aspen Process Explorer ® 2004.2.

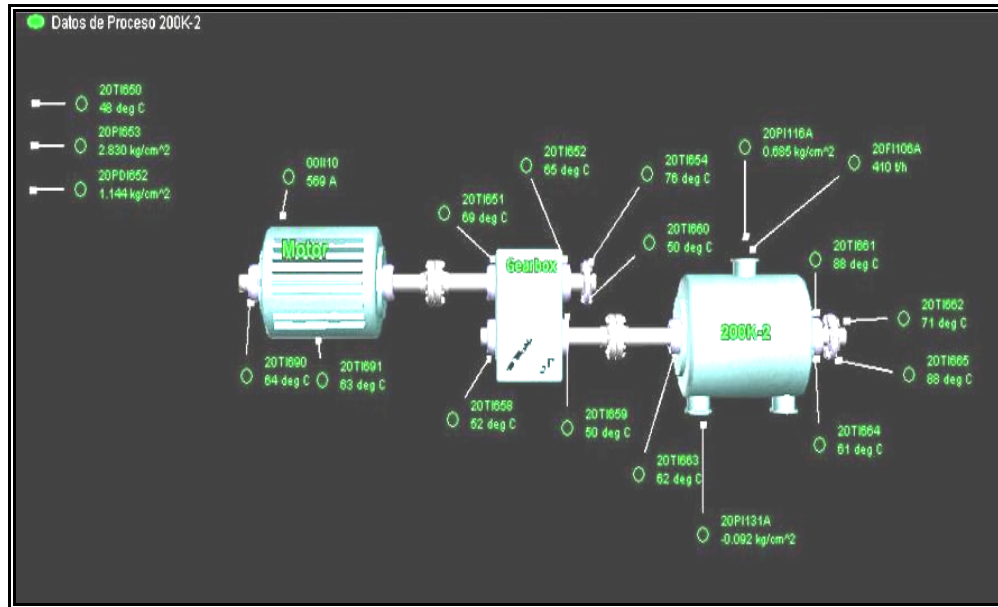


Figura 4. 19. Valores de las variables controladas del motor 200-MK-2.

Fuente: SISTEM 1 ®.

En vista de que la carga de operación actual del motor 200-MK-2 es mayor que la de diseño, esto podría causar el progresivo deterioro del equipo, y las fallas que constantemente ocurren en el motor. En la tabla 4.16 se comparan algunos parámetros de diseño con los operacionales del motor 200-MK-2, que son monitoreados en la planta Super Octanos C.A.

Tabla 4. 16. Parámetros de diseño y operacional del motor 200-MK-2.

Fuente: Super Octanos C.A.

PARÁMETRO	DISEÑO	OPERACIONAL
CARGA FLUJO DE AIRE [TM/h]	395,00	471,00
CORRIENTE [A]	565	569
TEMPERATURA EN COJINETES LADO LIBRE/LADO ACOPLE [°C]	HASTA 85 EN AMBOS	64/63
VELOCIDAD [rpm]	1795	1794

Una vez descritos todos los subsistemas necesarios para el funcionamiento del motor 200-MK-2, se encontró que algunos equipos de los subsistemas de lubricación

y de enfriamiento están sucios, con corrosión y desgaste de pintura en sus superficies. En cuanto al subsistema eléctrico de arranque, se destaca que los equipos, escobillas, anillos colectores, motor y caja reductora, solamente se usan una vez cuando el motor es arrancado o parado. Pero el anillo de cortocircuito una vez que entra en funcionamiento lo sigue haciendo de manera continua, por lo que siempre está operando, lo que significa que este componente está continuamente sometido a esfuerzos, ya que es un punto de contacto por el que circula una corriente elevada. Según el ENT, este equipo es sensible a los cambios de voltaje, corriente y vibración, y son altas las probabilidades de que falle a medida que pasa el tiempo. La falla del anillo de cortocircuito ocurre cuando se produce la fundición de los contactos planos o cilíndricos.

4.2. Análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del motor 200-MK-2.

Para la realización del Análisis de Modos y Efectos de Fallas del motor 200-MK-2, el Equipo Natural de Trabajo, en reuniones sostenidas, decidió analizar los subsistemas que conforman el motor 200-MK-2 en su contexto general, debido a que cada uno de ellos cumple una función específica que influye directamente en la pérdida de la función del motor 200-MK-2. El AMEF consistió en los siguientes pasos:

- 1. Determinar las Funciones de cada subsistema:** Para la descripción de la función y estándares de operación de cada subsistema, fue necesaria una generalización completa, basada en manuales de operación y mantenimiento, así como también la experiencia del ENT.
- 2. Determinar las Fallas Funcionales de cada subsistema:** Para la ejecución de este paso se contó con la experiencia del ENT, así se conocieron las diferentes

formas en que cada subsistema deja de cumplir con el estándar de funcionamiento.

3. **Determinar los Modos de Falla para cada falla funcional:** Para la realización de este paso se usó la data histórica y los conocimientos del ENT mediante tormentas de ideas y procesos lógicos de deducción.
4. **Determinar los Efectos de Falla para cada modo de falla:** Para cada modo de falla se identificaron todas las posibles consecuencias que estas pueden implicar para la empresa.

El AMEF permitió identificar las fallas potenciales de cada subsistema con el propósito de eliminarlas o de minimizarlas, proponiendo nuevas actividades de mantenimiento preventivo. En las tablas 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran los resultados del AMEF de cada subsistema que conforma al motor 200-MK-2.

Tabla 4. 17. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema de lubricación del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE SuperOctanos C.A.

Fuente: Propia.


 Super Octanos, C.A.		UNIDAD DESHIDROGENACIÓN (UNIDAD 200)	SISTEMA MOTOR ELECTRICO	TAG 200-MK-2	SUBSISTEMA LUBRICACION	
FACILITADOR ING. JOSÉ F. GARCIA M.		AUTOR BR. JOSÉ A. TAYUPO. C	FECHA 22/01/2010	HOJA 1 de 4		
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL ¿De qué forma falla?	MODO DE FALLA ¿Qué causa la falla?		EFFECTOS DE FALLA ¿Qué sucede cuando hay falla?	
1	Suministrar aceite a los cojinetes del motor 200-MK-2 a una presión de 0,2 Kg/cm ² , con un caudal de 18 Lts/min y a una temperatura de hasta 45 °C.	A	El subsistema de lubricación no suministra aceite a los cojinetes del motor 200-MK-2.	1	Cojinetes obstruidos.	Los cojinetes se sobrecalientan generándose altas temperaturas en el motor 200-MK-2, iniciándose el proceso de paro por alta temperatura.
				2	Filtro de aceite 200-MS-53A/B tapado.	La presión diferencial a través del filtro aumenta, la presión aguas abajo del filtro decae, iniciándose el proceso de paro del motor 200-MK-2 por baja presión.
				3	Fuga en los componentes de sellado del subsistema de lubricación (empaques y sellos).	El subsistema comenzará a trabajar de forma ineficiente, produciendo un incremento de la temperatura, el motor 200-MK-2 queda fuera de servicio por alta temperatura y baja presión.
				4	Fugas externas a través de válvulas (prensaestopas)	Baja la presión en el subsistema de lubricación, se detiene el motor 200-MK-2 por baja presión.
	B	El subsistema funciona pero no entrega el lubricante a la presión y caudal requerido.	1	Desgaste parcial en los engranajes de la bomba tipo tornillo 200-P-52A/B.	Al desgastarse los engranajes la presión de salida de la bomba descende, se activa el proceso de paro del motor 200-MK-2, por bajo nivel de presión.	
			2	Asientos de válvulas desgastados.	Se incrementan las pérdidas menores por lo que el flujo del lubricante disminuye y se detiene el motor 200-MK-2.	
			3	Voltaje bajo en la línea de alimentación del motor 200-MP-52A/B.	No se genera la fuerza suficiente para el funcionamiento del motor por lo que la bomba no envía el lubricante al caudal y presión requerida, saliendo fuera de servicio el motor 200-MK-2 por baja presión.	

Tabla 4. 17. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema de lubricación del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE Super Octanos C.A. (continuación)



Fuente: Propia.


UNIDAD DESHIDROGENACIÓN (UNIDAD 200)		SISTEMA MOTOR ELECTRICO	TAG 200-MK-2	SUBSISTEMA LUBRICACION		
FACILITADOR ING. JOSÉ F. GARCIA M.		AUTOR BR. JOSÉ A. TAYUPO. C	FECHA 22/01/2010	HOJA 2 de 4		
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL ¿De qué forma falló?	MODO DE FALLA ¿Qué causa el fallo?		EFECTOS DE FALLA ¿Qué sucede cuando hay fallo?		
		4	Falta de lubricación de la bomba 200-P-52A/B.	Al no tener una correcta lubricación se puede incurrir en daños en los rodamientos y en el recalentamiento de los cojinetes del motor 200-MK-2.		
		5	Taponamiento parcial de los filtros de aceite 200-MS-53A/B.	En caso de taponamiento parcial el subsistema trabajara de forma ineficiente con baja presión y caudal, quedando el motor 200-MK-2 fuera de servicio.		
		6	Falta de lubricación en los motores de las bombas tipo tornillo 200-MP-52A/B.	Daños en rodamientos, recalentamiento y pérdida de aislamiento, poniendo en riesgo al operador, y el subsistema no opera a la presión y caudal requerido.		
	C	El subsistema funciona pero no entrega el lubricante a la temperatura requerida.	1	Acumulación de sedimentos en las superficies de los tubos del intercambiador de calor 200-E-51A/B.	Transferencia de calor insuficiente disminuyendo la película de aceite, produciendo alta temperatura y generando el desgaste de los cojinetes del motor 200-MK-2.	
			2	Obstrucción de los tubos del intercambiador de calor 200-E-51A/B.	Se restringe total o parcialmente el flujo de calor aumentando la temperatura del lubricante, el motor 200-MK-2 podría quedar fuera de servicio por alta temperatura en cojinetes.	
			3	Fuga interna en el intercambiador de Calor 200-E-51A/B.	Ocurre una mezcla entre el fluido caliente y el frío, se contamina el fluido enfriador, aumentando la temperatura del lubricante.	

Tabla 4. 18. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema de enfriamiento del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE Super



Super Octanos, C.A.

Octanos C.A.

Fuente: Propia.




UNIDAD DESHIDROGENACIÓN (UNIDAD 200)		SISTEMA MOTOR ELECTRICO	TAG 200-MK-2	SUBSISTEMA ENFRIAMIENTO	
FACILITADOR ING. JOSÉ F. GARCIA M.		AUTOR BR. JOSÉ A. TAYUPO. C	FECHA 22/01/2010	HOJA 3 de 4	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL ¿De qué forma falló?	MODO DE FALLA ¿Qué causa el fallo?		EFFECTOS DE FALLA ¿Qué sucede cuando hay fallo?
Mantener la temperatura interna del motor 200-MK-2 en 35 °C con un flujo de agua de 90 m ³ /h y a una presión de 5 Kg/cm ² .	A	El subsistema no mantiene la temperatura interna del motor 200-MK-2 en 35 °C con un flujo de agua de 90 m ³ /h y a una presión de 5 Kg/cm ² .	1	Corrosión o sedimentos acumulados en el intercambiador de calor del motor 200-MK-2.	Se reduce la transferencia de calor, calor producido por las partes activas del motor, generándose un calentamiento que haría ceder el aislamiento del rotor o estator produciendo daños en el motor 200-MK-2.
			2	Obstrucción parcial de los conductos de aire del motor 200-MK-2.	El aire caliente no sale completamente del motor incrementando la temperatura alrededor del rotor y el estator, reduciendo el aislamiento de ambos.
			3	Fugas en la línea de descarga del agua de enfriamiento.	Disminución de la presión y del flujo de entrada al intercambiador de calor del motor 200-MK-2, produciendo calentamiento interno.
	B	El subsistema funciona pero no entrega el agua a la presión y caudal requerido.	1	Filtro parcialmente obstruido	El subsistema opera de forma ineficiente con una caída de presión, la presión aguas abajo del filtro decae, no llegando el caudal requerido al motor 200-MK-2.
			2	Fugas por los sellos mecánicos de las bombas 200-MP-1A/B/C.	Las fugas de agua de enfriamiento no permiten llegar el caudal requerido al intercambiador de calor del motor 200-MK-2.
			3	Desgaste en el impulsor	No se entrega el caudal suficiente, la bomba puede sufrir daños en sus componentes debido a los esfuerzos generados.
			4	Desgaste en cojinetes de motor y bomba.	Se generan vibraciones, el subsistema de enfriamiento trabaja de forma ineficiente no enviando el agua a la presión y caudal requerido.

Tabla 4. 19. Hoja de Información (AMEF) para el subsistema eléctrico de arranque del motor 200-MK-2 de la empresa productora de MTBE Super Octanos C.A.

Fuente: Propia.

 UNIDAD DESHIDROGENACIÓN (UNIDAD 200)		SISTEMA MOTOR ELECTRICO	TAG 200-MK-2	SUBSISTEMA ELECTRICO DE ARRANQUE	
FACILITADOR ING. JOSÉ F. GARCIA M.		AUTOR BR. JOSÉ A. TAYUPO. C	FECHA 22/01/2010	HOJA 4 de 4	
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL ¿De qué forma falló?	MODO DE FALLA ¿Qué causa el fallo?		EFFECTOS DE FALLA ¿Qué sucede cuando hay fallo?	
Canalizar la energía eléctrica para el correcto funcionamiento del motor 200-MK-2 a 569 A y a una velocidad de 1795 rpm.	A El subsistema no canaliza la energía eléctrica para hacer funcionar al motor 200-MK-2 a 569 A y a una velocidad de 1795 rpm.	1 Anillos colectores y escobillas deteriorados o mal calibrados.	Cuando la superficie de los anillos colectores o de las escobillas están desgastadas, rayadas o sucias, o se han descalibrado el motor no arrancara debido a que no hay contacto para el paso de la electricidad y el motor no entra en servicio.		
		2 Fundición de los contactos del anillo de cortocircuito.	Una vez que el motor 200-MK-2 arranca se cortocircuita mediante el anillo de cortocircuito, si los contactos de este anillo se funden, se corta el paso de corriente y el motor 200-MK-2 queda fuera de servicio.		
		3 Daños en protección diferencial eléctrica.	Al incrementarse el consumo de corriente y por consiguiente la temperatura, se dispara el diferencial de protección eléctrica quedando el motor 200-MK-2 fuera de servicio.		
	B El motor funciona a velocidades menores a 1795 rpm.	1 Fundición de algunos contactos del anillo de cortocircuito.	El anillo de cortocircuito posee ocho contactos, cuando se funde uno el motor sigue funcionando, pero con un desempeño inferior, alto consumo de corriente y reducción en su velocidad.		
		2 Una fase interrumpida.	El motor 200-MK-2 es trifásico, si una de sus fases se interrumpe el motor sigue funcionando pero con una reducción en su velocidad de giro.		
	C El motor opera consumiendo más de 565 A.	1 Anillo de cortocircuito con algunos contactos parcialmente fundidos.	El anillo de cortocircuito del motor posee ocho contactos, cuando se funden algunos, el motor sigue funcionando pero con un alto consumo de corriente y calentamiento, lo que al poco tiempo conduce a la falla del mismo, cortando el paso de corriente. También la temperatura de operación del motor se incrementa.		

4.3. Análisis causa raíz de la falla en el equipo crítico del motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración.

Una vez realizado el Análisis de Modos y Efectos de Fallas se procedió a la elaboración del Análisis Causa Raíz de la falla crítica del motor 200-MK-2, para lo cual el Equipo Natural de Trabajo decidió que se realizara un diagrama de Pareto que permitirá separar las fallas en los equipos de los subsistemas del motor 200-MK-2 que más impactan en el tiempo fuera de servicio (TFS), y así establecer un orden de prioridades. Luego se construirá un árbol de fallas de la falla crítica, ordenando de manera lógica los posibles eventos que podrían originarla, además se observará de forma gráfica la relación entre el modo de falla particular y la causa básica que la produce.

4.3.1. Determinación de las Fallas Críticas del Motor 200-MK-2 aplicando el Principio de Pareto

Con el objeto de saber cual de las fallas en los equipos de los subsistemas del motor 200-MK-2 influye en mayor medida en los tiempos fuera de servicio y por lo tanto en las pérdidas de oportunidades de producción de la planta Super Octanos C.A., se lleva a cabo el análisis de Pareto con el cual se podrán decidir las prioridades de intervención de mantenimiento.

El análisis de Pareto se realizó ejecutando los siguientes pasos:

- 1. Clasificación de los datos:** Los datos se clasificaron por tipo de falla.
- 2. Periodo de observación:** Se utilizaron las fallas de la data histórica desde el año 1997 hasta el año 2009.

3. **Obtención de datos y ordenarlos:** Para este paso se preparó la tabla 4.20, que recoge los datos según las pautas establecidas en las fases precedentes. Se ordenan los problemas por orden de importancia, según el tiempo fuera de servicio (TFS), el problema con mayor TFS se dispone en primer lugar.
4. **Preparar los ejes cartesianos para el diagrama:** Este paso se realizó con el software Microsoft Excel®, en el eje X se dispondrán los tipos de fallas y en el eje Y los TFS acumulados.
5. **Diseñar el diagrama:** Se procede a representar en escala los valores que se han determinado en la tabla.

En la tabla 4.20 se presenta las fallas jerarquizadas, tiempo fuera de servicio y el acumulado de tiempos fuera de servicio, durante el periodo de observación.

Tabla 4. 20. Jerarquización de las fallas.

Fuente: Propia.

POSICIÓN DE LA FALLA	TIPO DE FALLA	TFS (HORAS)	TFS ACUMULADO (HORAS)	CANTIDAD DE FALLAS	%
1	Anillo de cortocircuito	410,913	410,913	18	82,0
2	Fuga de aceite por sellos	24,833	435,746	1	4,50
3	Tubo roto	22,558	458,304	1	4,50
4	Cable rotos	21,5	479,804	1	4,50
5	Daños en protección diferencial eléctrica	9,50	489,304	1	4,50
TOTAL				22	100

En la figura 4.20 se muestra el diagrama de Pareto, el cual indica que el anillo de cortocircuito, perteneciente al subsistema eléctrico de arranque, produce el 80% de las paradas del motor 200-MK-2. Por tanto una decisión razonable en vías de mejoras, es concentrar los esfuerzos de mantenimiento en este equipo, ya que como se aprecia representa el equipo más crítico.

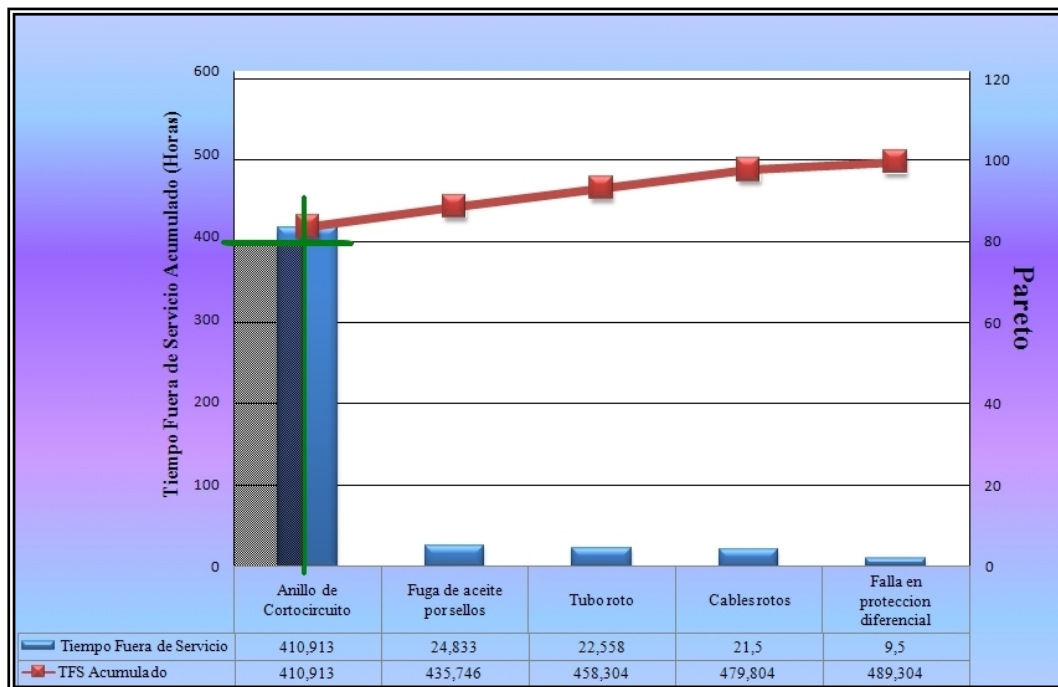


Figura 4. 20. Diagrama de Pareto de las fallas que se producen en el motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

4.3.2. Árbol de Falla de la Falla en el Anillo de Cortocircuito del Motor 200-MK-2 del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración.

Una vez encontrada que la falla en el anillo de cortocircuito es la que más impacto genera en los tiempos fuera de servicio del motor 200-MK-2, y por lo tanto de la planta, ya que el motor 200-MK-2 es un equipo crítico, el ENT decidió enfocar el estudio a la falla del anillo de cortocircuito, con el fin de entender su origen, por

medio del estudio de los distintos factores físicos, humanos y latentes, que podrían originarla.

En la figura 4.21 se muestra un esquema de los subsistemas que constituyen al motor 200-MK-2 donde se indica el equipo crítico.

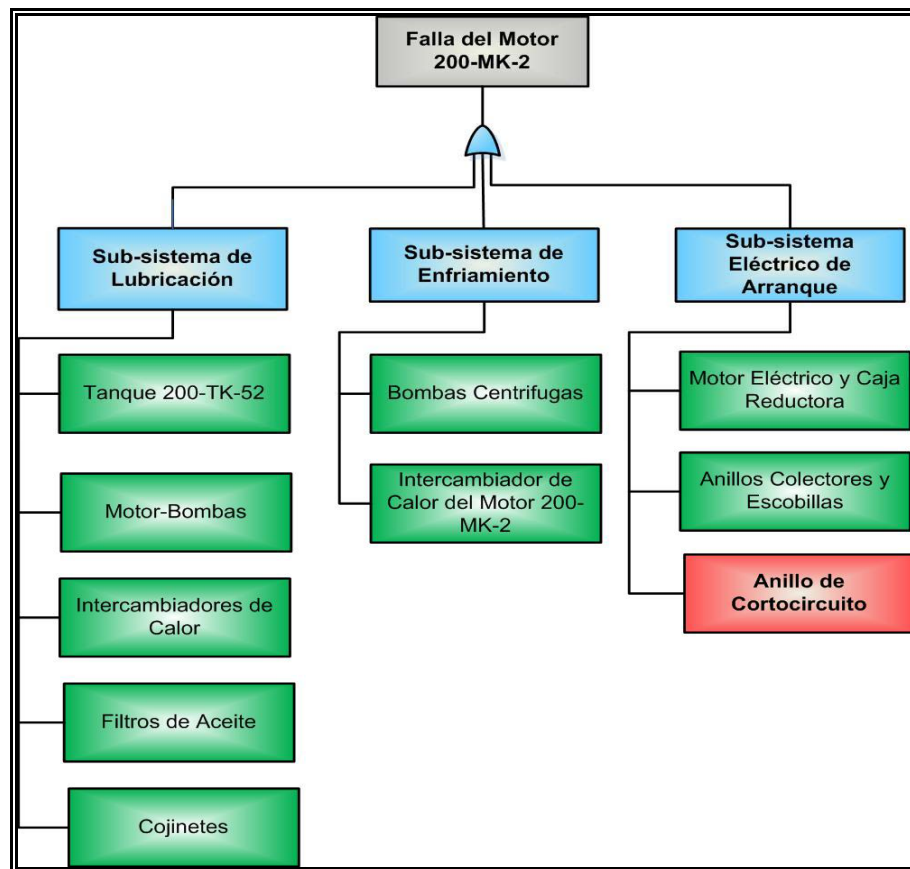


Figura 4. 21. Esquema indicando el equipo crítico, en rojo, del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

El ENT decidió que se evaluara el modo de falla más común que se ha presentado en el anillo de cortocircuito que es la fundición de las superficies de contacto. El análisis causa-raíz del anillo de cortocircuito dividido en los eventos que podrían causar la falla del mismo se muestra en la figura 4.22.

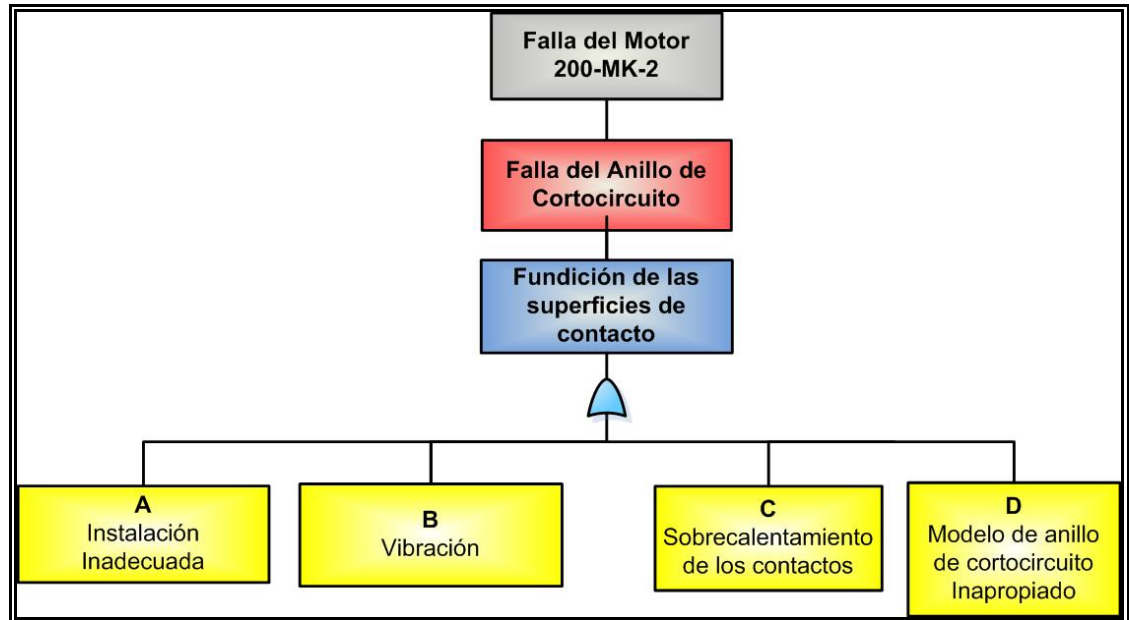


Figura 4. 22. Árbol de Fallas del Análisis Causa - Raíz divididos en eventos que podrían causar la falla del anillo de cortocircuito.

Fuente: Propia.

A continuación se explica cada bloque del análisis causa raíz.

A. Instalación Inadecuada: Desde el año 1991 hasta 1999 el motor estuvo operando con el anillo de cortocircuito que trajo de fábrica. En el año 1999 se instaló un nuevo modelo de anillo de cortocircuito, desde entonces se ha contado con la asistencia técnica de ANSALDO (fabricante del motor) para su ensamblaje en las diferentes paradas de planta programadas. En el resto de las intervenciones el ensamblaje ha sido realizado con personal propio. La causa raíz que se determinó en este bloque fue la falta de experiencia en el armado del anillo, si bien existe un procedimiento para realizar el ensamblaje hay puntos que se pueden mejorar para garantizar un armado correcto. En la figura 4.23 se muestra el bloque A del análisis causa-raíz.

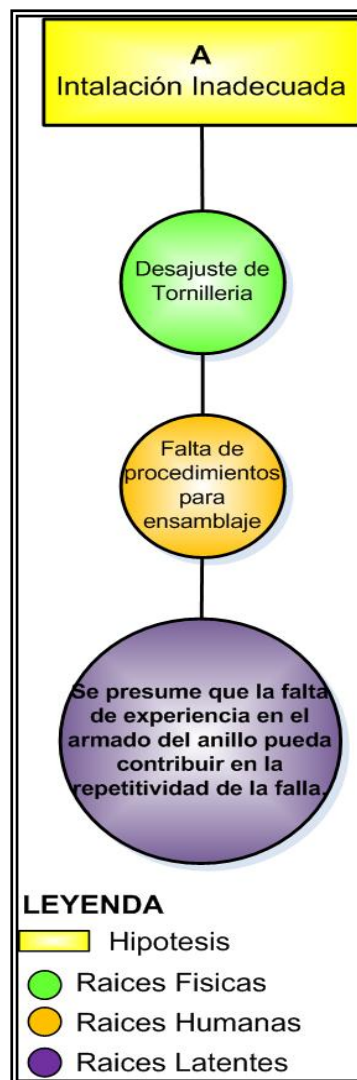


Figura 4. 23. Bloque A del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.

Fuente: Propia

B. Vibración: Las vibraciones en el anillo de cortocircuito originan una distancia de separación entre los contactos planos y cilíndricos, lo que podría ser la causa de la formación de un arco eléctrico que produce la fundición de uno de los contactos. En el anexo G se observa una gráfica del monitoreo continuo de vibraciones, con el software Sistem 1®, en el lado libre vertical del motor 200-MK-2 y de la temperatura en la succión del compresor 200-K-

2, donde se indica que cada vez que hay una variación abrupta de temperatura, ocurre un pico de vibración en el espectro, se presume que estas vibraciones son las que originan el proceso de falla del anillo de cortocircuito. En la figura 4.24 se muestra el bloque B del análisis causa-raíz.



Figura 4. 24. Bloque B del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.

Fuente: Propia.

C. Sobrecalentamiento de los contactos: Dentro de este bloque existen dos manifestaciones observables que afectan directamente la continuidad operativa del motor 200-MK-2. A continuación se explican cada una de ellas:

1. Variaciones de Voltaje: Los cambios producidos en la magnitud del voltaje, por fallas en la subestación o fallas a nivel estatal, producen el calentamiento de los contactos. Cuando el voltaje se reduce o aumenta el motor debe reducir o aumentar su velocidad para volver a estabilizarse, esto hace que a través del anillo circule una alta cantidad de corriente, por un periodo de tiempo muy corto, esta corriente provoca un gran calentamiento en el punto de contacto que genera el desgaste de los contactos tanto planos como cilíndricos. La causa raíz de este bloque es la deficiencia de mantenimiento preventivo y correctivo a las redes eléctricas externas al motor 200-MK-2. En la figura 4.25 se muestra el bloque C del análisis causa-raíz.

2. Variaciones de flujo en la descarga del compresor 200-K-2: Las variaciones del flujo en la descarga del compresor producen sobrecarga de corriente del motor y con ello la falla del anillo de cortocircuito. Al ocurrir alguna irregularidad en las válvulas u otros dispositivos colocados en la línea de descarga, la carga del motor 200-MK-2 aumenta y requiere más potencia, esto hace que por el anillo circule una gran cantidad de corriente. Esta cantidad de corriente, aunque por muy corto tiempo, produce el desgaste del anillo de cortocircuito por el calentamiento que ocurre. La causa raíz de este bloque es la deficiencia de mantenimiento preventivo en la línea de descarga del compresor. En la figura 4.25 se muestra el bloque C del análisis causa-raíz.

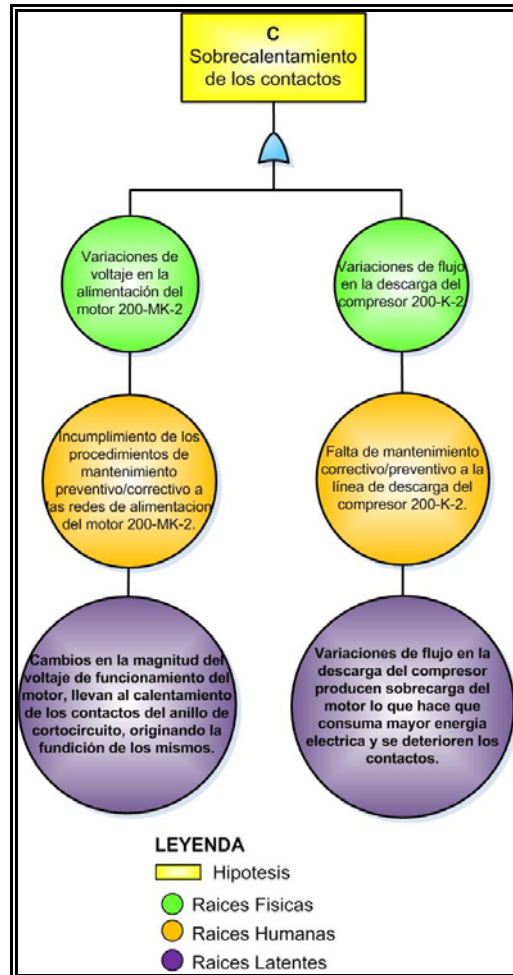


Figura 4. 25. Bloque C del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.

Fuente: Propia.

D. Modelo de Anillo de Cortocircuito Inapropiado: Si la superficie de contacto entre contactos planos y contactos cilíndricos no es la adecuada, y si el modelo no permite reducir las pequeñas vibraciones que se originan debido a las condiciones operacionales, el anillo presentará fallas continuamente. El modelo inicial del anillo de cortocircuito constaba de un solo contacto plano. En el año 1999 el fabricante del motor ANSALDO, recomendó un nuevo modelo de anillo, este modelo consta de un set de 8 con 6 contactos planos y uno cilíndrico. Sin embargo a pesar de las modificaciones la falla se ha

mantenido. La causa raíz que se encontró en este bloque, fue que el modelo de anillo no es el apropiado para las condiciones de funcionamiento en las que se encuentra el motor. En la figura 4.26 se muestra el bloque D del análisis causa-raíz.

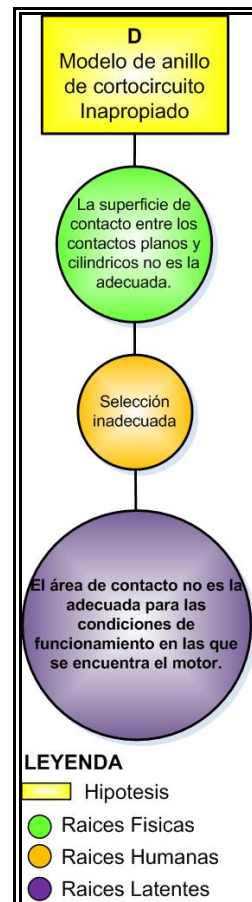


Figura 4. 26. Bloque D del Árbol de Fallas en el Análisis Causa - Raíz.

Fuente: Propia

En la figura 4.27, se presenta un esquema general del Análisis Causa Raíz realizado a la falla del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2 del sistema de compresión de aire de regeneración de la planta productora de MTBE Super Octanos C.A.

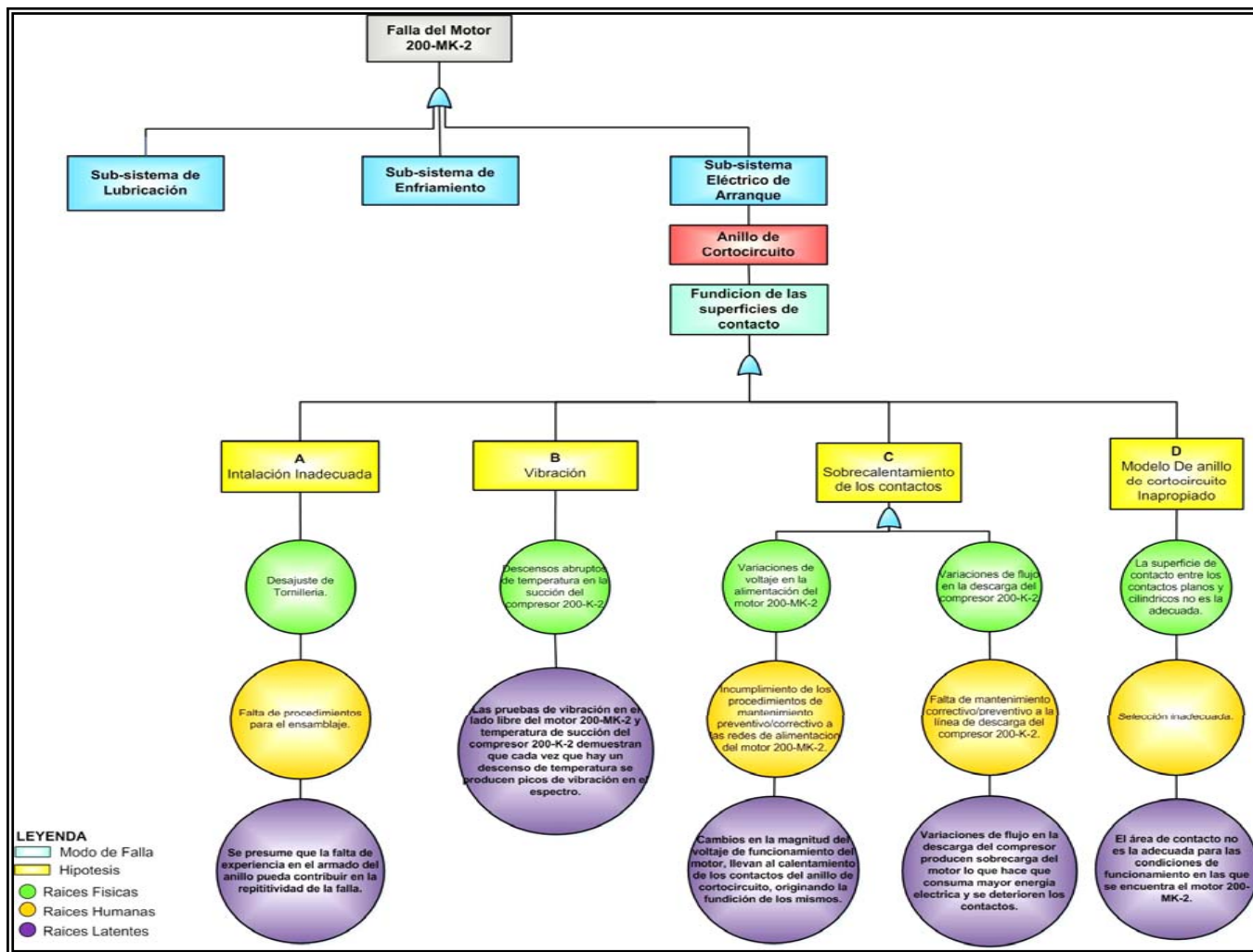


Figura 4. 27. Análisis Causa Raíz realizado a la falla del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

4.4. Indicadores de efectividad del motor 200-MK-2

En busca de caracterizar el estado actual del motor 200-MK-2 y predecir su comportamiento futuro basado en la confiabilidad y en la filosofía de mantenimiento, mediante el historial de fallas y reparaciones, y con el objeto de mejorar efectivamente la productividad, a través de la sistemática reducción de la ocurrencia de fallas y eventos no deseados en el motor 200-MK-2, el ENT en reuniones establecidas decidió que los indicadores de efectividad a estimar en esta investigación sean los siguientes:

1. Confiabilidad para un tiempo igual al tiempo promedio entre fallas (TPEF).
2. Mantenibilidad para un tiempo igual al tiempo promedio fuera de servicio (TPFS).
3. Disponibilidad.

Para el cálculo de los indicadores TPEF y confiabilidad, se usará la ecuación de Weibull que requiere del uso de la data histórica del motor 200-MK-2. El ENT decidió tomar una muestra de la data histórica que va desde el año 1997 hasta el año 2009. De esta data histórica se recopilaron los datos de Tiempos Entre Fallas (TEF) y de Tiempo Fuera de Servicio (TFS). Para la determinación de los parámetros de la ecuación de Weibull y el tiempo promedio entre fallas se utilizará el programa Crystal Ball®, este programa funciona como un complemento de Microsoft Excel® 2007. A continuación, en la figura 4.28, se muestra un diagrama de bloques con los procedimientos que se realizarán para el cálculo de los indicadores de efectividad del motor.

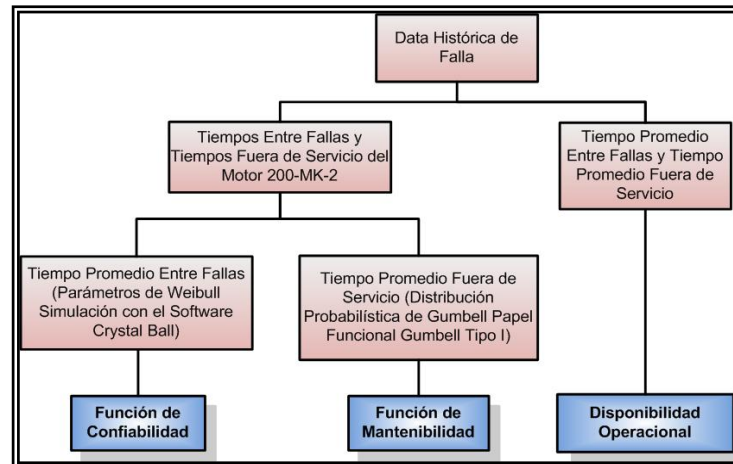


Figura 4. 28. Diagrama del procedimiento de cálculo de los Indicadores de Efectividad.

Fuente: Propia.

4.4.1. Confiabilidad y Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF)


Para el cálculo de estos indicadores se utilizará el programa Crytall Ball® y se supondrá que los datos se ajustan a la distribución de Weibull, que es la que mejor se adapta para estimar probabilidad, basada en tiempos de vida de equipos o componentes, se procedió al cálculo de la siguiente manera:

1. Para determinar los tiempos entre fallas (TEF), se restarán las fechas de “parada” con las fechas de “arranque”, de la misma línea (Ver tabla 4.21), y los resultados se transformarán en horas decimales. El tiempo obtenido de esta manera es el tiempo entre falla, es decir, el tiempo que tarda operando el equipo desde una puesta en marcha hasta que se presenta la falla, y el equipo queda fuera de servicio.


La información de los TEF fue vaciada en una hoja de Excel, como se muestra en la tabla 4.21.

Tabla 4. 21. Data historica del motor 200-MK-2.

Fuente: Microsoft Excel 2003.

Motor del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración			 SUPER OCTANOS, C.A.
INDICADORES DE EFECTIVIDAD			
Empresa:	Super Octanos C.A		
Ubicación:	Complejo Criogénico JOSE		
Fecha de Estudio:	25/07/1997 AL 08/07/2009		
Unidad:	200		
Sistema	Compresión de Aire de Regeneración		
Equipo	Motor Eléctrico		
Tag:	200-MK-2		
DATA HISTORICA			DATOS
Arranque	Parada	TEF	TEF
25/07/1997 05:00	18/04/1998 20:55	6423:55:00	6423,92
19/04/1998 06:25	10/12/1998 17:48	5651:23:00	5651,38
11/12/1998 16:21	05/07/1999 16:52	4944:31:00	4944,52
06/07/1999 14:22	13/02/2000 05:52	5319:30:00	5319,50
14/02/2000 06:48	01/11/2000 22:55	6280:07:00	6280,12
02/11/2000 22:55	06/06/2001 17:32	5178:37:00	5178,62
07/06/2001 13:16	29/12/2001 00:24	4907:08:00	4907,13
29/12/2001 16:46	26/07/2002 14:35	5013:49:00	5013,82
27/07/2002 04:42	22/02/2003 23:49	5059:07:00	5059,12
24/02/2003 02:39	23/09/2003 02:06	5063:27:00	5063,45
24/09/2003 00:51	22/04/2004 11:58	5075:07:00	5075,12
23/04/2004 08:07	05/01/2005 21:00	6180:53:00	6180,88
07/01/2005 02:15	12/05/2005 07:15	3005:00:00	3005,00
12/05/2005 23:15	16/09/2005 04:21	3029:06:00	3029,10
16/09/2005 22:21	29/01/2006 05:41	3223:20:00	3223,33
30/01/2006 16:16	23/06/2006 08:48	3448:32:00	3448,53
24/06/2006 12:48	10/12/2006 01:02	4044:14:00	4044,23
11/12/2006 06:42	03/06/2007 01:18	4170:36:00	4170,60
04/06/2007 02:08	05/12/2007 09:36	4423:28:00	4423,47
06/12/2007 08:11	11/06/2008 16:55	4520:44:00	4520,73
12/06/2008 13:03	20/12/2008 16:20	4587:17:00	4587,28
21/12/2008 12:59	07/07/2009 07:51	4746:52:00	4746,86
08/07/2009 07:21	Actualidad		0,00

2. El siguiente paso, fue determinar los parámetros de forma, escala y posición utilizando el programa Crystal Ball®, de la siguiente manera:

2.1. Una vez ejecutado el programa Crystal Ball® se introducen los datos de TEF, luego en la barra de herramientas se hace click en la pestaña de Crystall Ball y despues en “Define Assumption” . En el cuadro de diálogo que aparecerá, se escoge la distribución paramétrica de Weibull y se le da click al boton “Fit...”. La figura 4.29 muestra este paso.

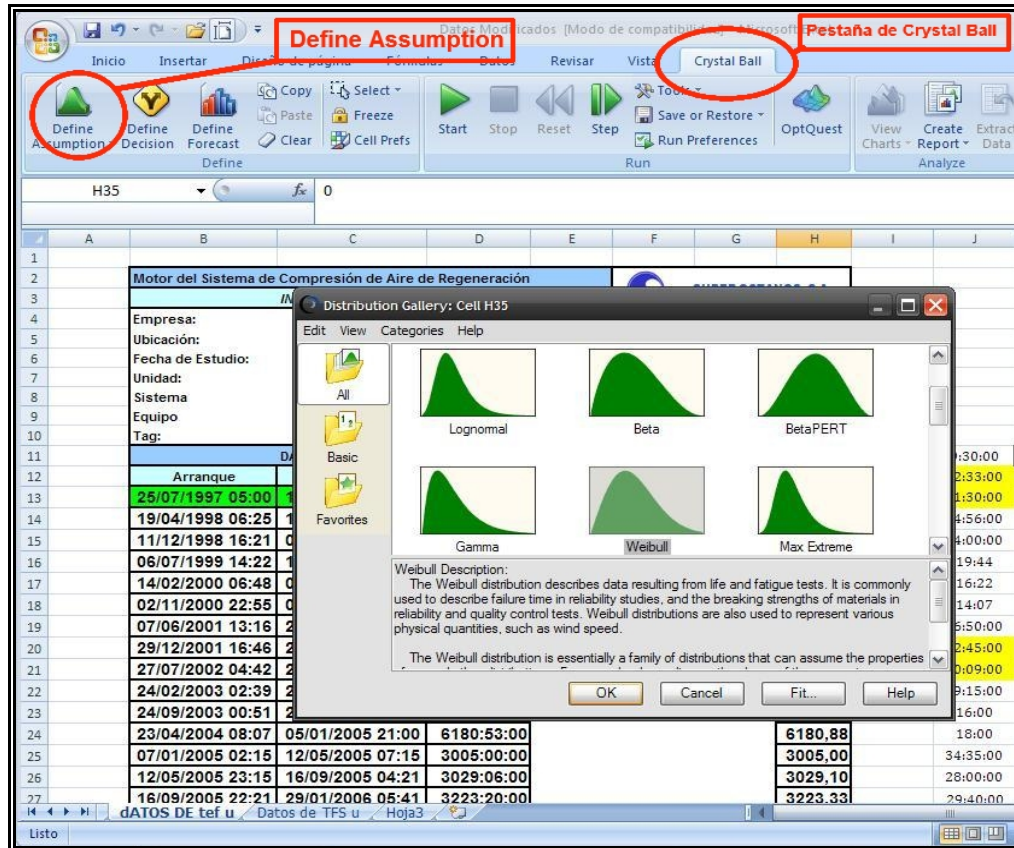


Figura 4. 29. Selección de la distribución de Weibull en el programa Crystal Ball® 11.0.

Fuente: Programa Microsoft Excel® 2007 y Crystal Ball® 11.0.

2.2. Aparecera el cuadro de dialogo “Fit Distribution”. En el campo “Range” se seleccionan las celdas que poseen la información de los TEF, en “Distributions to Fit” se selecciona “Weibull” y en “Rank by goodness of fit statistic” o ranking del metodo de bondad de ajuste se escoge “Autoselect”. Se marca la casilla “Show Comparison Chart and Goodness of Fit Statistics” y a continuación se le da click en el boton “Ok”. En la figura 4.30 se muestra este paso.

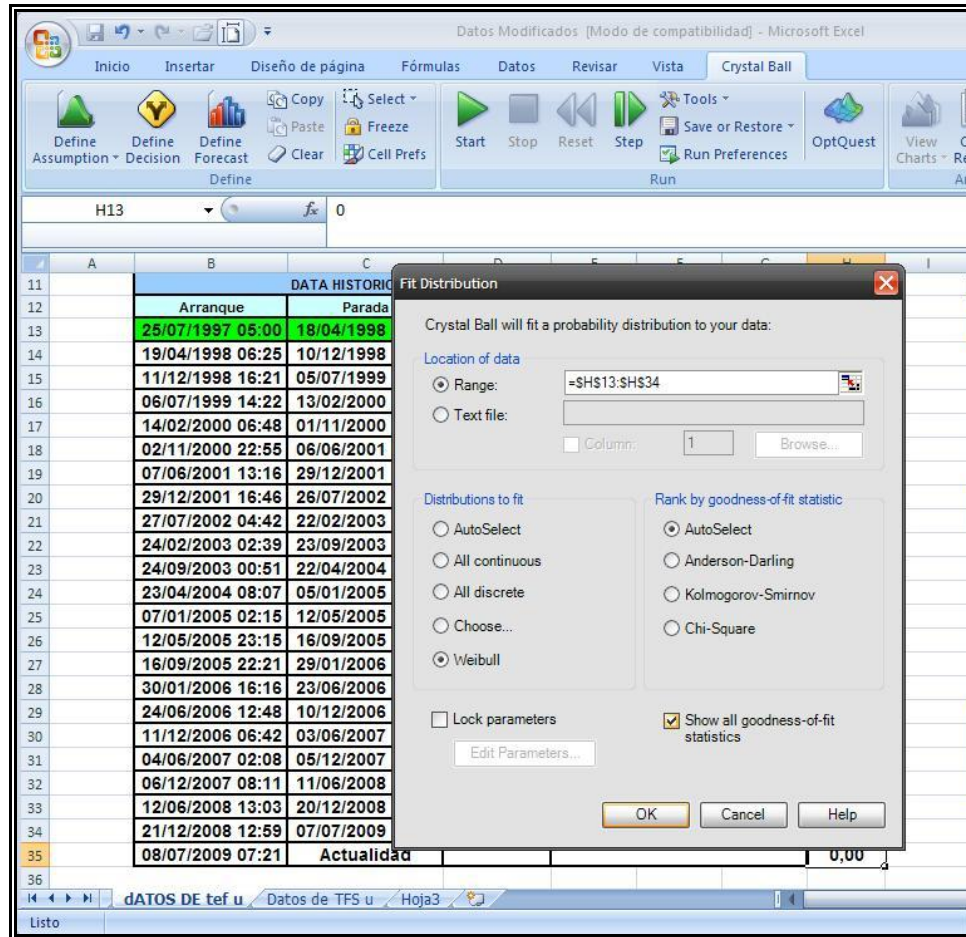


Figura 4. 30. Selección de Celdas que poseen los Tiempos entre Fallas.

Fuente: Programa Microsoft Excel® 2007 y Crystal Ball® 11.0.

- 2.3. Una vez presionado el boton “OK”, sale la siguiente ventana, en ella se muestran los parámetros de la distribución de Weibull, también se muestran los percentiles. En la figura 4.31 se compara el ajuste de la distribución de Weibull a los datos. Se observa tambien un cuadro con los parámetros estadísticos de la Distribucion de Weibull ajustada y de los datos sin ajuste, entre ellos el TPEF. Ver figura 4.31.

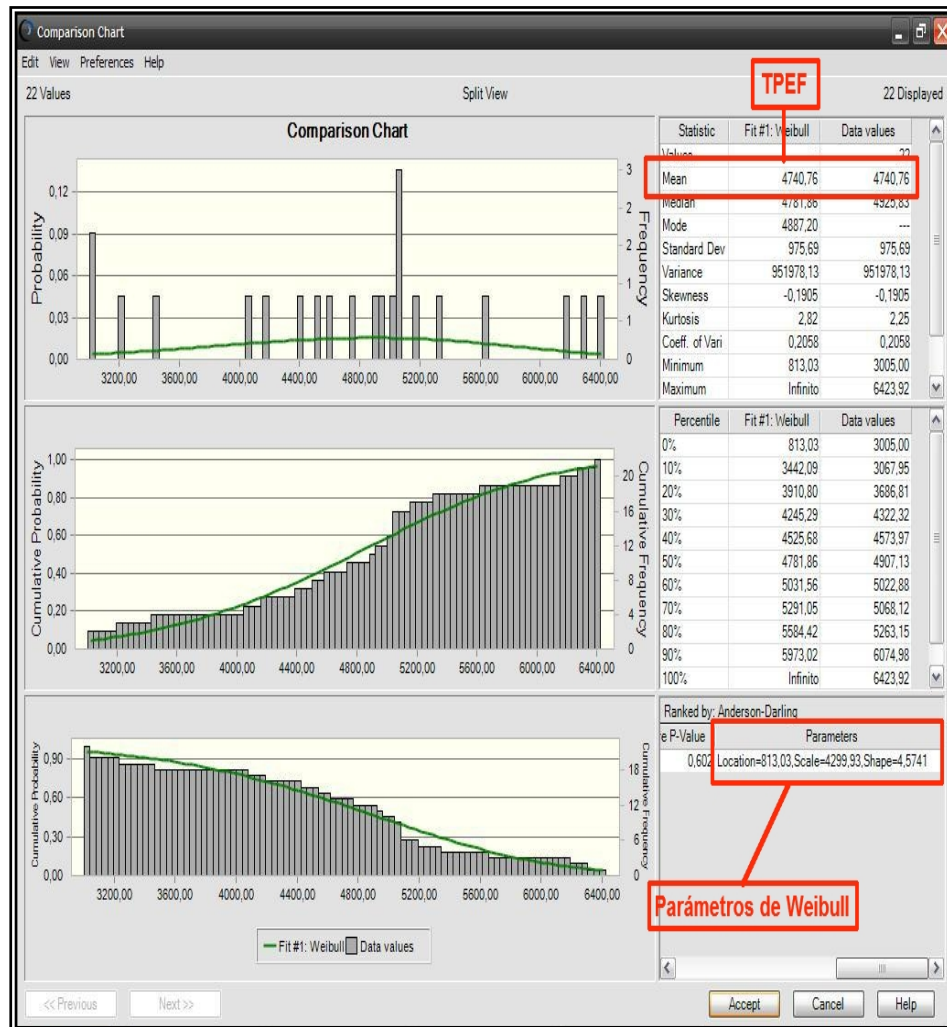


Figura 4. 31. Resultados del ajuste de los datos a la distribución de Weibull.

Fuente: Programa Microsoft Excel® 2007 y Crystal Ball® 11.0.

2.4. Se presiona el boton “Accept”. En la figura 4.32 y en la tabla 4.22 se muestran los resultados de la distribución de probabilidad de Weibull, los parámetros (β = forma o Shape, η = escala o Scale y γ = posición o Loc.) y el Tiempo Promedio Entre Fallas.

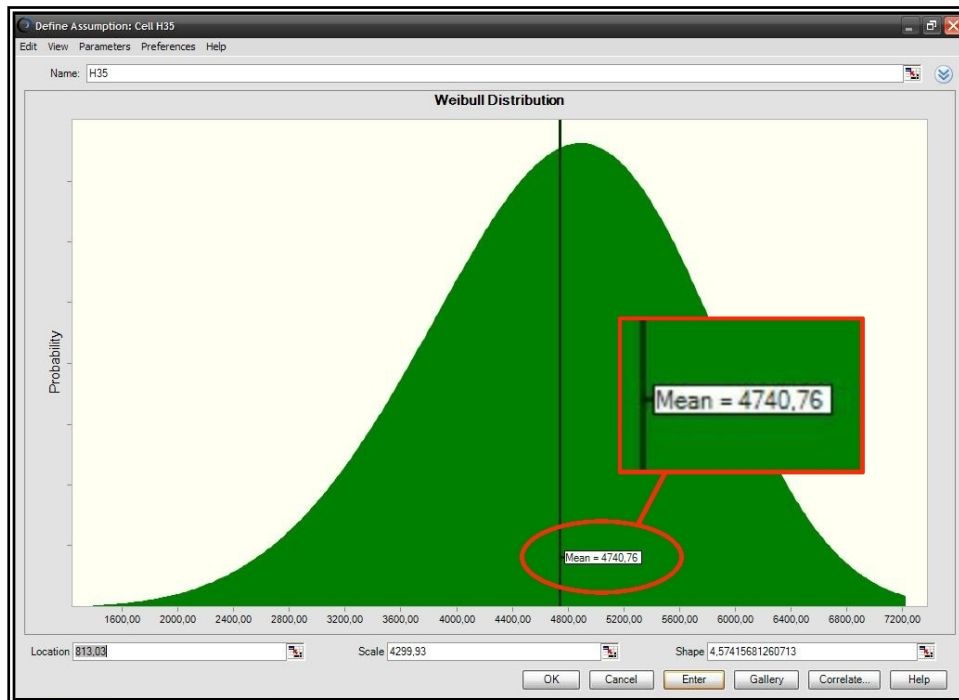


Figura 4. 32. Resultados de los Parámetros de Weibull y tiempo promedio entre fallas.

Fuente: Programa Microsoft Excel® 2007 y Crystal Ball® 11.0.

Tabla 4. 22. Resultados de la Distribución de Weibull por Crystall Ball ® 11.0.

Fuente: Propia.

DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL		
POSICIÓN O LOC	γ	813,03
ESCALA O SCALE	η	4299,93
FORMA O SHAPE	β	4,57
TIEMPO PROMEDIO ENTRE FALLAS [HORAS]	TPEF	4740,76
CONFIABILIDAD [%]	R(TPEF)	51,04

2.5. Se procedió a introducir los parámetros anteriormente calculados en las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3) y (2.4) obteniéndose la confiabilidad, la

tasa de falla, la distribución de fallas y la función acumulativa de distribución de fallas. En la tabla 4.23 se muestran los resultados.

Tabla 4. 23. Tabla de Resultados que muestra la Frecuencia Acumulada de Fallas, la Confiabilidad, la Tasa de Falla, la Distribución de Fallas y la probabilidad de falla del Motor 200-MK-2.

Fuente: Programa Microsoft Excel® 2007.

i	TEF	R(t)	$\lambda(t)$	f(t)	F(t)
1	3005,000	0,955	0,0000959	0,0000916	0,045
2	3029,100	0,953	0,0000997	0,0000950	0,047
3	3223,330	0,931	0,0001346	0,0001254	0,069
4	3448,530	0,899	0,0001851	0,0001664	0,101
5	4042,970	0,763	0,0003827	0,0002920	0,237
6	4170,600	0,724	0,0004394	0,0003182	0,276
7	4423,470	0,638	0,0005695	0,0003632	0,362
8	4520,730	0,602	0,0006262	0,0003768	0,398
9	4587,280	0,576	0,0006672	0,0003846	0,424
10	4746,860	0,514	0,0007736	0,0003975	0,486
11	4907,130	0,450	0,0008921	0,0004012	0,550
12	4944,520	0,435	0,0009215	0,0004006	0,565
13	5013,820	0,407	0,0009779	0,0003980	0,593
14	5059,110	0,389	0,0010161	0,0003953	0,611
15	5063,450	0,387	0,0010198	0,0003950	0,613
16	5075,120	0,383	0,0010298	0,0003941	0,617
17	5178,620	0,342	0,0011219	0,0003842	0,658
18	5319,500	0,290	0,0012566	0,0003640	0,710
19	5651,380	0,180	0,0016194	0,0002916	0,820
20	6180,880	0,064	0,0023463	0,0001491	0,936
21	6280,120	0,050	0,0025049	0,0001251	0,950
22	6423,840	0,034	0,0027480	0,0000941	0,966

Una vez calculados el TPEF y la confiabilidad para el TPEF, se procedió a verificar este método, realizando el cálculo manual de los parámetros de Weibull, para comprobar el porcentaje de error y asegurarse de la fiabilidad de los resultados. (Ver Anexo B)


4.4.2. Mantenibilidad y Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS)

Para la determinación de los tiempos fuera de servicio, se restaron las fechas de “Arranque” con las fechas de “Parada” de la línea anterior, en la data histórica (Ver tabla 4.24). Los tiempos obtenidos de esta manera son los tiempos fuera de servicio, es decir, el tiempo desde que el equipo se detiene por una falla hasta que esta nuevamente operando. Este tiempo incluye: el tiempo de localización de la falla, tiempo de espera de materiales y repuestos, tiempo administrativo, tiempo de reparación y el tiempo de arranque, pruebas y calentamiento.

Para el cálculo de la mantenibilidad y el tiempo promedio fuera de servicio (TPFS) se procedió según el método gráfico-analítico de la distribución de Gumbell, descrito en el capítulo II. Los datos disponibles del tiempo fuera de servicio se dan en la tabla 4.24.

Tabla 4. 24. Data histórica del motor 200-MK-2.

Fuente: Microsoft Excel® 2007.

Motor del Sistema de Compresión de Aire de Regeneración			
INDICADORES DE EFECTIVIDAD			
Empresa:	Super Octanos C.A		
Ubicación:	Complejo Criogénico JOSE		
Fecha de Estudio:	25/07/1997 AL 08/07/2009		
Unidad:	200		
Sistema:	Compresión de Aire de Regeneración		
Equipo:	Motor Eléctrico		
Tag:	200-MK-2		
DATA HISTORICA			DATOS
Arranque	Parada	TFS	TFS
25/07/1997 05:00	18/04/1998 20:55	9:30:00	9,50
19/04/1998 06:25	10/12/1998 17:48	22:33:00	22,55
11/12/1998 16:21	05/07/1999 16:52	21:30:00	21,50
06/07/1999 14:22	13/02/2000 05:52	24:56:00	24,93
14/02/2000 06:48	01/11/2000 22:55	24:00:00	24,00
02/11/2000 22:55	06/06/2001 17:32	19:44:00	19,73
07/06/2001 13:16	29/12/2001 00:24	16:22:00	16,37
29/12/2001 16:46	26/07/2002 14:35	14:07:00	14,12
27/07/2002 04:42	22/02/2003 23:49	26:50:00	26,83
24/02/2003 02:39	23/09/2003 02:06	22:45:00	22,75
24/09/2003 00:51	22/04/2004 11:58	20:09:00	20,15
23/04/2004 08:07	05/01/2005 21:00	29:15:00	29,25
07/01/2005 02:15	12/05/2005 07:15	16:00:00	16,00
12/05/2005 23:15	16/09/2005 04:21	18:00:00	18,00
16/09/2005 22:21	29/01/2006 05:41	34:35:00	34,58
30/01/2006 16:16	23/06/2006 08:48	28:00:00	28,00
24/06/2006 12:48	10/12/2006 01:02	29:40:00	29,67
11/12/2006 06:42	03/06/2007 01:18	24:50:00	24,83
04/06/2007 02:08	05/12/2007 09:36	22:35:00	22,58
06/12/2007 08:11	11/06/2008 16:55	20:08:00	20,13
12/06/2008 13:03	20/12/2008 16:20	20:39:00	20,65
21/12/2008 12:59	07/07/2009 07:51	23:30:00	23,50
08/07/2009 07:21	Actualidad		

Para la determinación de la función de mantenibilidad de Gumbell y el Tiempo Promedio Fuera de Servicio, se procedió de la siguiente manera:

1. Se colocan en una columna los T.F.S en un orden establecido, en forma creciente $i=1,2,3,\dots,n$; en donde “**n**” es la muestra de los T.F.S.
2. Se determinan los valores numéricos de $M'(t)$, se calculan de acuerdo a la expresión de rangos medios para un número de datos menor que 50, utilizando la ecuación 2.6.

$$M'(t) = \frac{1 - 0,3}{22 + 0,4} * 100 = 3,13$$

La tabla 4.25 muestra los resultados de los dos primeros pasos.

Tabla 4. 25. Tiempos fuera de servicio ordenados en forma creciente con sus respectivos valores de $M'(t)$.

Fuente: Propia.

	TFS	$M'(t)$
1	9,50	3,13
2	14,12	7,59
3	16	12,05
4	16,367	16,52
5	18	20,98
6	19,733	25,45
7	20,13	29,91
8	20,15	34,38
9	20,65	38,84
10	21,5	43,30
11	22,5	47,77
12	22,5	52,23
13	22,558	56,70
14	23,5	61,16
15	24	65,63
16	24,833	70,09
17	24,933	74,55
18	26,833	79,02
19	28	83,48
20	29,25	87,95
21	29,667	92,41
22	34,583	96,88

3. Se grafican los puntos $M'(t)$ vs T.F.S en el papel funcional de Gumbell tipo I.
4. Los puntos graficados se ajustan a una recta representativa.

La figura 4.33, muestra los pasos 3 y 4.

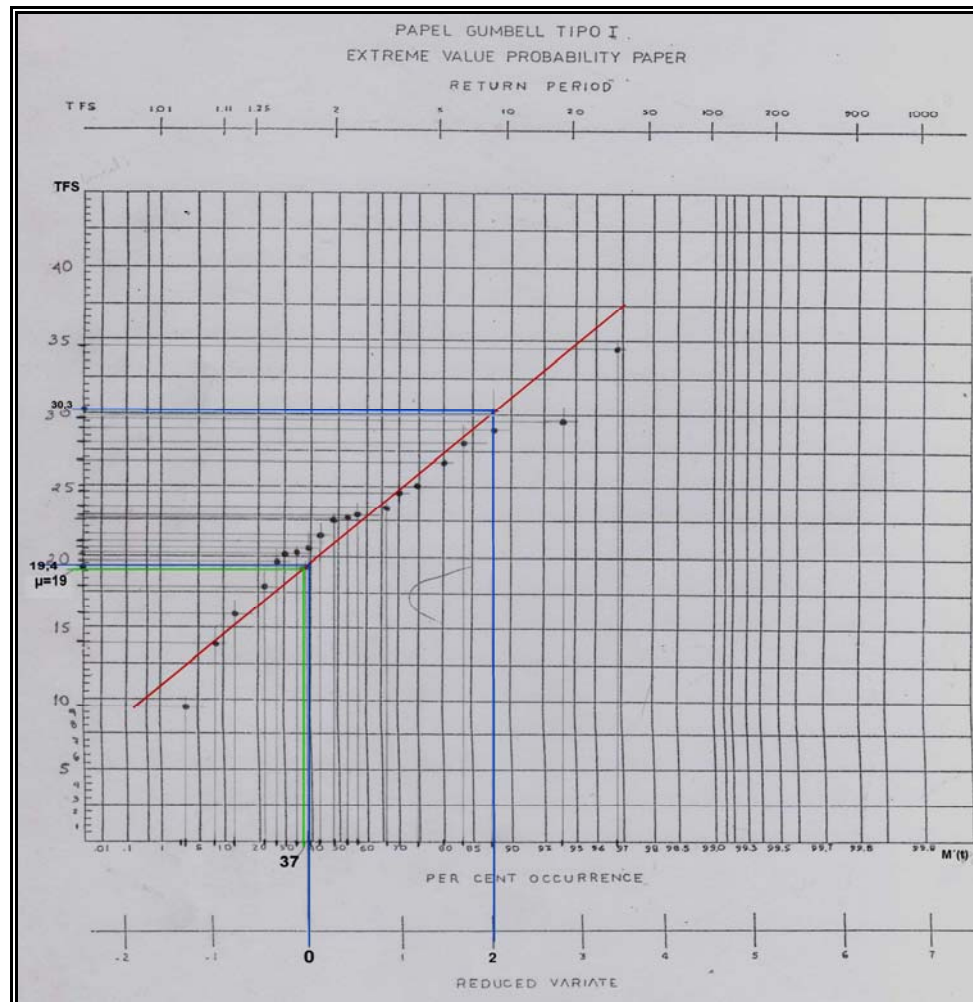


Figura 4. 33. Gráfico de Mantenibilidad en papel funcional Gumbell Tipo I.

Fuente: Propia.

5. El papel de Gumbell, tiene una “Escala reducida” (horizontal). Se trazan dos verticales tomando los números cero (0) y dos (2) de esta escala, hasta tocar la recta graficada. Luego se leen sus valores en la escala vertical (eje Y), con estos valores se halla la pendiente de la recta, como sigue:

$$m = \frac{X_2 - X_0}{2 - 0} = \frac{30,3 - 19,4}{2 - 0} = 5,45$$

6. Se halla el valor de “a”, que es el inverso de la pendiente calculada, como se muestra:

$$a = \frac{1}{m} = \frac{1}{5,45} = 0,183$$

7. Se halla el valor de “μ” trazando una vertical por el valor 37% del eje X, hasta que se corte a la recta graficada en ese punto se traza una horizontal hasta el eje Y, ese será el valor de “μ”.

$$\mu = 19 \text{ _ Horas}$$

8. Se calcula el tiempo promedio fuera de servicio (T.P.F.S) de la distribución de Gumbell, con la ecuación 2.10 como se muestra a continuación:

$$TPFS_G = \mu + \frac{0,5778}{a} = 19 + \frac{0,5778}{0,183} = 22,16 \text{ _ Horas}$$

9. Con los datos de “a” y “μ” se obtiene la función de mantenibilidad del motor 200-MK-2.

$$M(t) = e^{-\left[e^{-5,45(t-0,183)} \right]}$$

Para finalizar se calcula el tiempo promedio fuera de servicio (T.P.F.S) de los datos para compararlo con el obtenido por Gumbell, estos valores deben tener muy pocas diferencias para que la data se vea representada por la distribución de Gumbell.

$$TPFS_D = \frac{\sum TFS_i}{n} = \frac{489,62}{22} = 22,25 \text{ _ Horas}$$

Como se puede observar $TPFS_G \approx TPFS_D$, y los datos están bien representados por la distribución de Gumbell.

En la tabla 4.26 se muestran los resultados de mantenibilidad del motor 200-MK-2.

Tabla 4. 26. Resultados de Mantenibilidad del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

PARÁMETRO DE POSICIÓN “ μ ” [HORAS]	PARÁMETRO DE FORMA “ a ”	TPFS [HORAS]	M(TPFS) [%]
19	0,183	22,16	57,07

4.4.3. Disponibilidad Operacional (Do)

Es el porcentaje de tiempo que el equipo quedó a disponibilidad del area de operación para desempeñar su funcion en el periodo de analisis y está dada por la ecuacion 2.8. En este caso se está calculando la disponibilidad operacional del equipo, que depende del tiempo promedio entre fallas y del tiempo promedio fuera de servicio (en el tiempo fuera de servicio está incluido el tiempo de organizacion logistica de la empresa y el apoyo logistico que facilita el fabricante con el equipo entregado).

$$D_o = \frac{TPEF}{TPEF + TPFS}$$

$$D_o = \frac{4740,76Hrs}{4740,76Hrs + 22,26Hrs}$$

$$D_o = 0,99$$

A continuación se muestran en las figuras que van desde la 4.34 hasta la 4.37, los resultados en gráficas del motor 200-MK-2.

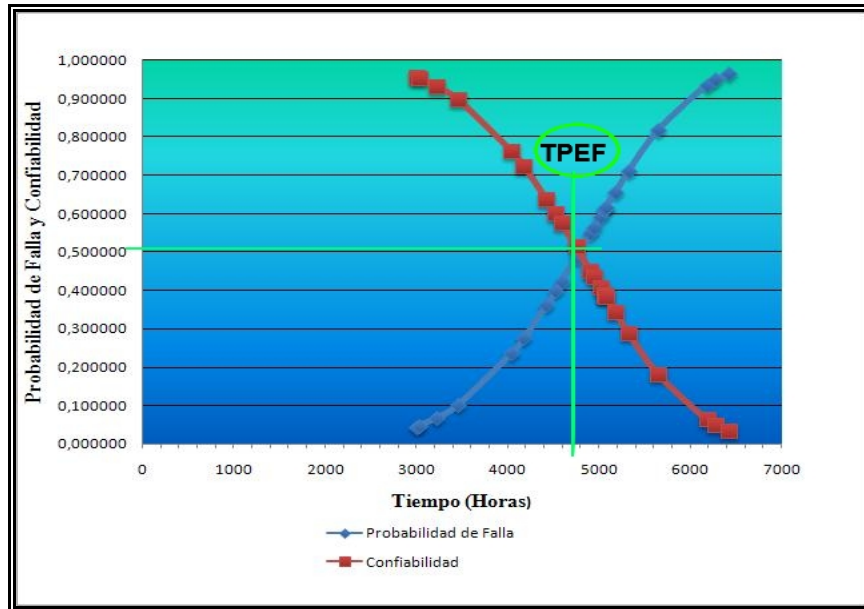


Figura 4. 34. Confiabilidad y Probabilidad de Falla vs. Tiempo entre Fallas

Fuente: Propia.

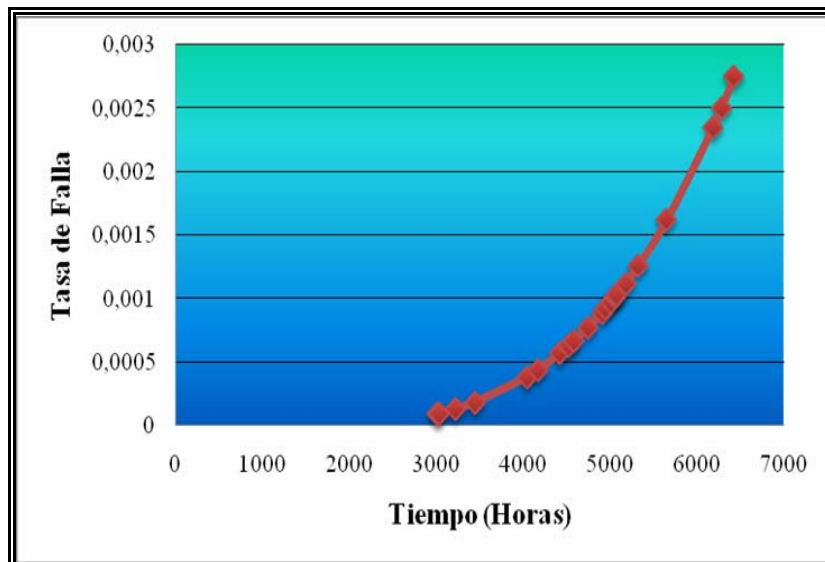


Figura 4. 35. Tasa de Fallas vs. Tiempo entre Fallas

Fuente: Propia

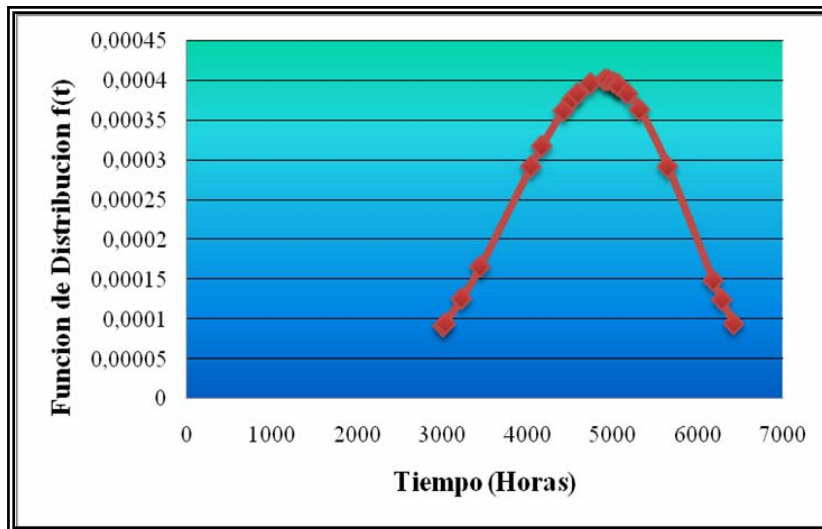


Figura 4. 36. Función Densidad de Probabilidad vs. Tiempo entre Fallas

Fuente: Propia

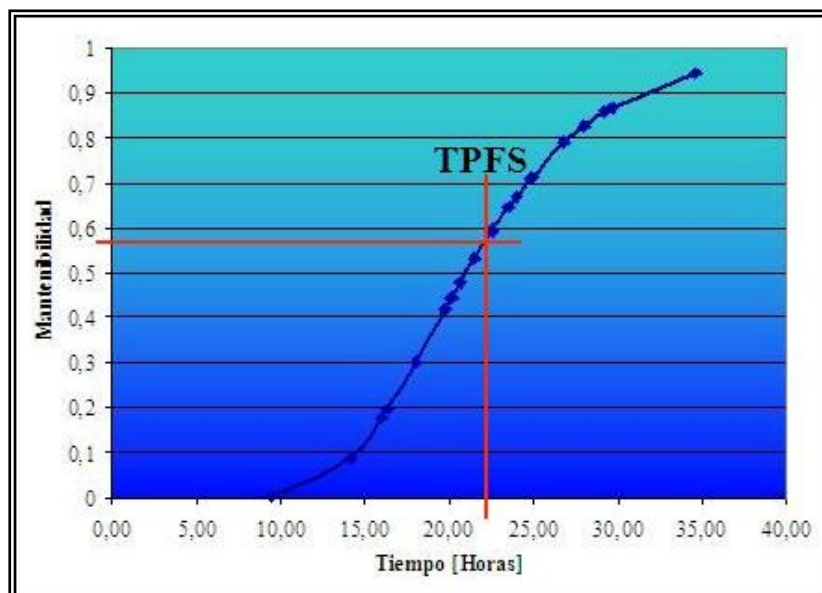


Figura 4. 37. Mantenibilidad vs. Tiempo Fuera de Servicio.

Fuente: Propia

A continuación en la tabla 4.27, se muestra el resumen de los resultados de los indicadores de efectividad del motor 200-MK-2: el tiempo probable de recuperación el equipo después de una falla (TPFS), el tiempo probable para la aparición de una falla (TPEF), la confiabilidad para el TPEF, la mantenibilidad para el TPFS y la disponibilidad.

Tabla 4. 27. Resultados de los Indicadores de Efectividad para el motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

EQUIPO	T.P.F.S	T.P.E.F.	CONFIABILIDAD R (TPEF)	MANTENIBILIDAD M(TPFS)	DISPONIBILIDAD OPERACIONAL
200-MK-2	22,16	4740,76	0,5104	0,5707	0,99

Estos indicadores demostraron el comportamiento operacional así como también el periodo de vida útil en la que se encuentra el motor 200-MK-2, que es el periodo de desgaste con $\beta=4,57$, pudiendo evaluar de manera cuantitativa la probabilidad de falla, generando propuestas en las actividades y planes de mantenimiento con respecto a las frecuencias de intervenciones.

Debido a que la gran mayoría de las fallas en los equipos no se presentan de manera brusca, en general son el resultado de un periodo de desgaste progresivo, y dada la importancia que tiene el motor 200-MK-2 en el proceso de producción de MTBE de la planta Super Octanos C.A., la empresa con el objeto de conocer el estado del motor 200-MK-2 en cuanto a su montaje y desgaste e ir eliminando progresivamente tareas de mantenimiento preventivo y a la vez conseguir disminuir la cantidad de las paradas imprevistas y aumentar la vida útil del mismo, cuenta con un programa de mantenimiento predictivo el cual consta de las técnicas de: análisis de vibraciones, análisis termográfico y análisis de lubricantes, los cuales son aplicados al motor 200-MK-2. Ya que estas tecnologías predictivas brindan la oportunidad de anticiparse a situaciones de fallas, representan un gran potencial en cuanto a la

planificación y programación del mantenimiento. El ENT estableció que como complemento de la estimación de los Indicadores de Efectividad, también se hiciera una estimación del Índice Relativo de Confiabilidad en el cual se aprovechen las tecnologías predictivas que actualmente se aplican al motor 200-MK-2 y se consideren las opiniones del ENT, y en el cual sean evaluados los siguientes factores: inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo. Esto permitirá medir el nivel reactivo del mantenimiento preventivo y al ser comparado con la confiabilidad obtenida de los Indicadores de Efectividad, servirá de base para plantear recomendaciones a las actividades de mantenimiento del motor 200-MK-2.

4.4.4. Estimación del Índice Relativo de Confiabilidad del Motor 200-MK-2.

El análisis de los factores relativos para la estimación del índice de confiabilidad estuvo a cargo del E.N.T, que consideró todos los factores mencionados en el capítulo II. Se lograron jerarquizar los distintos factores, dándole un peso a cada uno a fin de que el resultado de la suma sea 100%. Con el fin de establecer comparaciones entre la confiabilidad por Weibull y por el índice relativo para el mismo tiempo, esta estimación se hizo el 21 de Enero de 2010, que es la fecha aproximada sumando el TPEF después del último arranque.

La estimación de la confiabilidad se hizo comenzando por la inspección visual, luego con las pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo.

En la tabla 4.28 se observa el valor asignado a cada factor relativo.

Tabla 4. 28. Jerarquización de los distintos factores.

Fuente: Propia.

RESULTADOS DE LA DISCUSIÓN PARA LA JERARQUIZACIÓN DE LOS FACTORES A EVALUAR DEL MOTOR 200-MK-2	
FACTOR	% CONFIABILIDAD
INSPECCIÓN VISUAL	30
PRUEBAS Y MEDICIONES	40
EDAD DEL EQUIPO	10
MEDIO AMBIENTE	10
CARGA DE TRABAJO	10
TOTAL	100

4.4.4.1. Inspección Visual al motor 200-MK-2

Tomando en cuenta los aspectos a inspeccionar que proporcionarían al técnico una visión general de la condición en la que se encuentra el motor 200-MK-2 mientras esta en operación, el ENT estableció para este factor una puntuación de treinta (30). Según las características del motor 200-MK-2, el ENT decidió tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Corrosión en la carcasa del motor.
2. Suciedad y falta de pintura en la carcasa del motor.
3. Consumo de amperaje del motor.
4. Estado de lubricación.
5. Vibración.
6. Ruido.
7. Calentamiento del motor.
8. Fugas de aceite.
9. Tornillería y otros elementos de fijación.
10. Estado de gomas en acople con caja multiplicadora.



Además, se establecieron tres (3) niveles para calificar a cada uno de los aspectos anteriores. Estos niveles son:

1. **Normal:** Es la condición en la que se cumple con lo especificado y no hay interferencia en el cumplimiento de la función del equipo. Si esta condición se cumple la puntuación será de tres (3).
2. **Admisible:** Es la condición en que no se cumple completamente con lo especificado pero el equipo puede seguir operando sin efectos negativos en su funcionamiento. Si esta condición se cumple la puntuación será de dos (2).
3. **Critico:** Es la condición en que no se cumple con lo especificado y que interfiere en la función del equipo, por lo tanto debe ser reparado rápidamente para impedir daños mayores. Si esta condición se cumple la puntuación será de uno (1).

En la tabla 4.29 se muestra el formato para la evaluación de los aspectos que determinarán la confiabilidad según la inspección visual del motor 200-MK-2.

Tabla 4. 29. Valoración de los aspectos considerados en la inspección visual.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	Técnico: Jonathan Urdaneta	Fecha: 21/01/2010	
	Equipo: Motor Eléctrico	TAG: 200-MK-2	
INSPECCION VISUAL			
Condición Encontrada			Puntuación
Normal			3
Admisible			2
Crítico			1
ASPECTOS A INSPECCIONAR			Puntuación
Corrosión en la carcasa del motor 200-MK-2.			2
Suciedad y falta de pintura en la carcasa del motor 200-MK-2.			1
Consumo de amperaje del motor 200-MK-2.			2
Estado de lubricación.			2
Vibración.			2
Ruido.			3
Calentamiento del motor 200-MK-2.			2
Fugas de aceite.			3
Tornillería y otros elementos de fijación.			3
Estado de gomas en acople con caja multiplicadora.			2
TOTAL (Máximo 30)			22
Observaciones:			

4.4.4.2. Pruebas y Mediciones de Funcionamiento

En discusión sostenida con el ENT, se determinó que el factor más importante es el resultado de las pruebas y mediciones que se hagan al motor 200-MK-2, si estas resultan satisfactorias se tendrá por este concepto una puntuación de cuarenta (40), que fue el puntaje dado por el ENT, la cual puede disminuir cuando el resultado de dichas pruebas acuse la existencia de ciertos problemas que sacan en algún grado al motor de su funcionamiento esperado. Estas pruebas y mediciones ayudan a dar una visión más amplia de las condiciones reales en las que se encuentra el motor 200-

MK-2. Considerando las pruebas y mediciones que se le aplican al motor 200-MK-2, el ENT a cada prueba le asignó un puntaje para evaluarla. Las pruebas y mediciones con sus respectivos puntajes son los siguientes:

Análisis de Lubricantes.....	15
Análisis de Vibraciones.....	20
Termografía.....	5
TOTAL.....	<u>40 puntos</u>

➤ **Análisis de Lubricante al motor 200-MK-2**

En los análisis de aceite lubricante, se estudian las muestras para determinar si cumplen con los requisitos de lubricación. Los resultados del análisis pueden emplearse para determinar la vida del lubricante y, por tanto, cuando se debe cambiar o renovar para que siga cumpliendo los requisitos especificados.

Debido a la cantidad de parámetros que se obtienen como resultado del análisis de aceite, el ENT después de analizar todos los resultados decidió considerar solo algunos. A cada uno de estos aspectos también se le asignó un puntaje cuya suma da como resultado los quince (15) puntos dados al análisis de lubricante. Los parámetros a evaluar son los siguientes:

1. **Viscosidad Cinemática a 40 °C:** La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un fluido, siendo la resistencia que presenta el mismo a fluir. Es esencial que el lubricante conserve su viscosidad dentro de ciertos límites, ya que si la misma disminuye demasiado, se pueden producir desgastes prematuros y excesivos, incluso el deterioro de la pieza lubricada. Para realizar esta evaluación es necesario conocer las propiedades del aceite TurboLub ISO 46, que es el lubricante utilizado por los cojinetes del motor 200-MK-2. El ENT le asignó a este parámetro el valor de cinco (5) puntos.

- 2. Contenido de Agua:** El agua puede estar presente en el aceite en forma libre, diluida o emulsionada, siendo igualmente crítica su presencia, ya que afecta el espesor de la película de lubricante, disminuyéndola. Esto causa que las superficies de las máquinas o elementos mecánicos que se encuentran en movimiento relativo pierdan la protección y refrigeración que ofrecen los lubricantes. Además acelera la degradación del aceite, mediante la oxidación del mismo. El ENT acordó evaluar este parámetro con un máximo de cinco (5) puntos.

- 3. Metales:** Esta prueba determina la presencia de partículas en partes por millón (ppm), originadas por el desgaste normal de los componentes del equipo o máquina, así como de otros metales contaminantes. El ENT le asignó a este parámetro el valor de cinco (5) puntos, que fueron divididos en tres tipos de metales encontrados en el análisis, estos son:



 - a) Metales de Desgaste:** Este parámetro, indica desgastes en componentes particulares, como en los cojinetes, de una unidad estudiada permitiendo evaluar el estado del mismo. Hierro, cromo, plomo, cobre, son comunes. A este parámetro se le asignó el valor de tres (3) puntos.
 - b) Metales Aditivos:** Existen metales en numerosos paquetes de aditivos de lubricantes; la caída de concentración de los mismos dan una idea del deterioro de las propiedades del lubricante. Magnesio, Zinc, Calcio, son comunes. A este parámetro se le asignó el valor de uno (1).
 - c) Metales Contaminantes:** Los contaminantes externos (polvo, tierra, refrigerante) pueden ser detectados de acuerdo a componentes metálicos presentes en los mismos, indicando una falla en la estanqueidad del sistema lubricante. Silicio, Sodio, Aluminio, son comunes. A este parámetro se le asignó el valor de uno (1).

Buscando las mejores soluciones, a los efectos de que se logre aumentar la productividad y confiabilidad de la planta Super Octanos C.A., a través de las mejores prácticas tribológicas, acorde con la normativa vigente ASTM D-4378-03 y ASTM D-6439-05, la empresa Lubritech Venezuela C.A., es la encargada de realizar los análisis de lubricantes a los equipos dinámicos instalados en Super Octanos C.A.

Por otro lado, tomando en cuenta los valores estándar para los parámetros definidos anteriormente, el ENT decidió que la evaluación se hiciera con la escala que se muestra en el anexo E. Los resultados, según Lubritech Venezuela C.A., de los parámetros en estudio, junto con sus respectivos valores estándar, y los resultados de su evaluación, dados por el ENT, son presentados en la tabla 4.30. Los resultados para otros parámetros del análisis de lubricantes se dan en el anexo H.

Tabla 4. 30. Resultados de análisis de lubricante y puntuación de cada parámetro.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	ANÁLISIS DE LUBRICANTE			
	Equipo	Técnico		
	TAG	Fecha		
	Motor Eléctrico	Pablo Martínez		
	200-MK-2	21/01/2010		
Parámetro	Resultados según Lubritech Venezuela C.A.	Valor Estándar	Escala de Puntuación	Puntuación Obtenida
Viscosidad Cinemática a 40°C (cSt)	48,2	41,2 - 52,8	0-6	4
Contenido de Agua (ppm)	44	Hasta 100	0-4	2,4
Metal de desgaste (ppm)	Hierro (Fe): 1	Hasta 10	0-3	2,7
Metal Aditivo (ppm)	Calcio (Ca): 15	Hasta 50	0-0,25	0,166
	Magnesio (Mg): 2	Hasta 10	0-0,25	0,2
	Zinc (Zn): 7	Hasta 20	0-0,25	0,188
	Fosforo (P): 19	Hasta 30	0-0,25	0,083
Metal Contaminante (ppm)	Silicio (Si): 1	Hasta 10	0-1	0,9
TOTAL (Máximo 15)				10,64

Este análisis determinó la presencia de alto contenido de sólido en el aceite del sistema y gran cantidad de agua presente pero no emulsionada, factores que podrían afectar el desempeño del lubricante.

➤ **Análisis de Vibraciones al motor 200-MK-2**

La empresa Super Octanos C.A., cuenta con un plan de mantenimiento predictivo, que consta del monitoreo de las vibraciones del motor 200-MK-2 en los cojinetes del lado libre y del lado de acople, y en las posiciones vertical, horizontal y axial, para esto se utiliza el colector de vibraciones CSI 2130. Con el colector CSI 2130 Machinery Health Analyzer y un acelerómetro piezoeléctrico para altas temperaturas, se mide la vibración que genera el rotor. El departamento de Confiabilidad de la empresa Super Octanos C.A., proporcionó la data histórica de vibración para que fuera evaluada en el periodo en estudio.

Para la evaluación de las mediciones de vibración se utilizó la norma ISO 10816-3, la cual establece la evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas.

Las características más relevantes de la norma ISO 10816-3 son:

- Es aplicable a los equipos rotativos cuyo rango de velocidades de giro está entre 120 y 15000 rpm.
- Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de vibración en velocidad – valor eficaz, para frecuencias de vibración de 2 a 1000 Hz en máquinas de más de 120 rpm, y para frecuencias de 10 a 1000 Hz en máquinas de más de 600 rpm, distinguiendo varias clases de equipos rotativos:

- **Grupo 1:** Máquinas rotatorias grandes con potencia entre 300 KW y 50 MW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315$ mm.
- **Grupo 2:** Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 KW y 300 KW. Máquinas eléctricas con altura de eje $160 \leq H \leq 315$ mm.
- **Grupo 3:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 KW.
- **Grupo 4:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior 15 KW.

La evaluación de las vibraciones mediante la aplicación de la norma ISO 10816-3, se rige por la descripción de ciertas zonas de severidad, que dependen de la intersección de la velocidad de vibración obtenida con el grupo que corresponda a las características técnicas del equipo.

Las zonas de severidad son:

- **Zona A:** Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.
- **Zona B:** Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.
- **Zona C:** La condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un periodo de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada.
- **Zona D:** Los valores de vibración son peligrosos, la máquina puede sufrir daños.

En la figura 4.38 muestra la representación gráfica de las zonas definidas anteriormente.

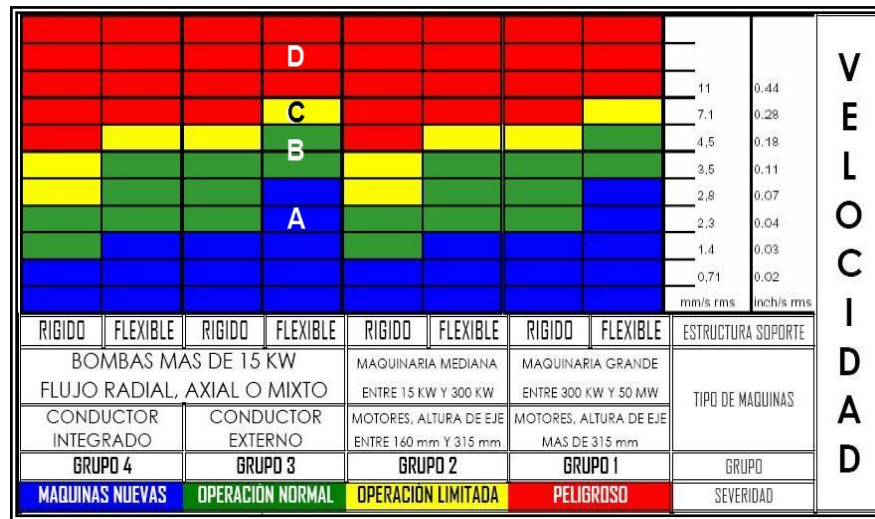


Figura 4. 38. Gráfica de las zonas de severidad de vibración según la norma ISO 10816-3.

Fuente: Normas ISO 10816-3. (2009)

Para utilizar la norma ISO 10816-3, basta con clasificar la máquina en estudio dentro de la clase correspondiente y una vez obtenido el valor global de vibración, localizar en la tabla la zona en la que se encuentra.

En reuniones sostenidas con el ENT, se acordó, tomando en cuenta la descripción de cada zona de severidad dada anteriormente, repartir los puntos para evaluar las vibraciones del motor 200-MK-2 de la manera en que se muestra en la tabla 4.31. El ENT consideró que se calificará con la puntuación más alta a las zonas A y B, ya que las vibraciones dentro de estos límites indican igualmente el perfecto funcionamiento del equipo y puede operar por largos periodos de tiempo.

Tabla 4. 31. Rango de puntos dados por el ENT para evaluar las vibraciones del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

NORMA ISO 10816-3	PUNTAJE
ZONA A	ENTRE 10 Y 20
ZONA B	
ZONA C	ENTRE 5 Y 10
ZONA D	ENTRE 0 Y 5

Para realizar la evaluación mediante la norma ISO, fue necesario dejar en claro algunas características del motor 200-MK-2:

- El motor está montado sobre una fundación rígida.
- El estudio se realizó midiendo las vibraciones en los cojinetes del lado libre y del lado acople del motor.
- El motor es considerado una maquinaria grande ya que su potencia de salida está entre 300 KW y 50 MW y posee un rotor con una altura de eje mayor que 315 mm.

Con la data histórica de vibración proporcionada por el departamento de Confiabilidad se determinó que la velocidad más alta de desplazamiento se encontró en el lado libre posición vertical. En la figura 4.39, se muestra un espectro tomado en el lado libre vertical con el colector CSI 2130, directamente en planta.

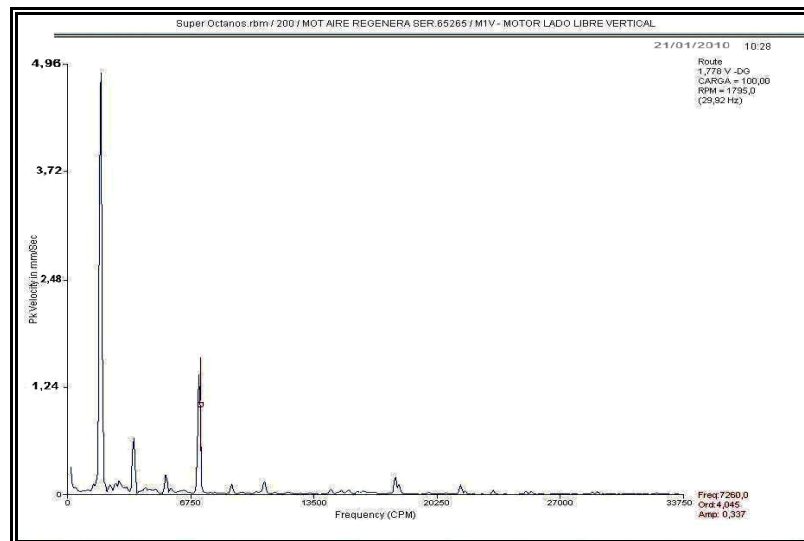


Figura 4. 39. Variación de la velocidad de vibración con respecto a los ciclos por minuto en el lado libre posición vertical.

Fuente: AMS Suite: Machinery Health Analyzer®.

El valor más alto de vibración obtenido fue de 4,96 mm/s, remitiéndonos a la norma ISO 10816-3 en la figura 4.40, tenemos:

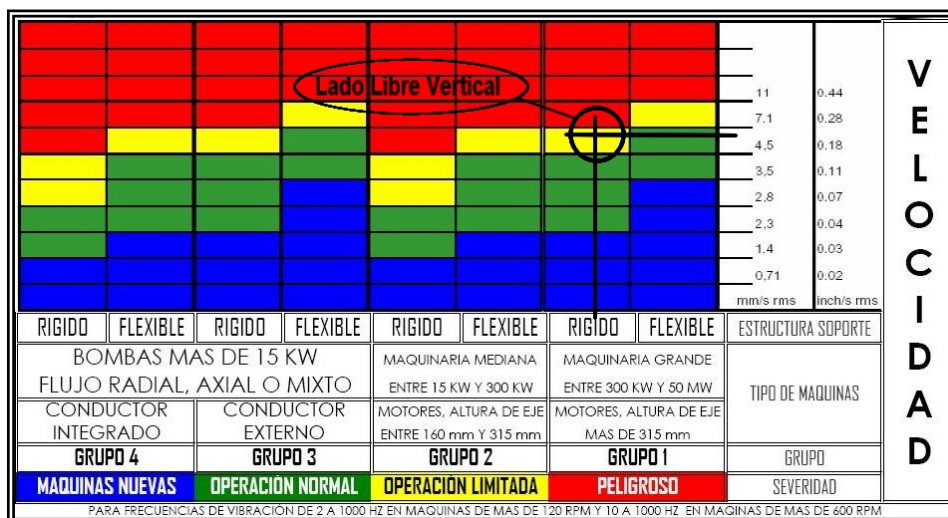




Figura 4. 40. Zona de severidad para el motor 200-MK-2.

Fuente: Norma ISO 10816-3.

Las vibraciones del motor 200-MK-2 en el lado libre posición vertical se encuentran dentro de la zona C, es decir, el equipo esta en un estado operativo limitado y deben tomarse medidas correctivas en la próxima parada programada. La puntuación dada por el ENT se muestra en la tabla 4.32.

Tabla 4. 32. Puntuación asignada por ENT a la evaluación de las vibraciones del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	SEVERIDAD DE VIBRACIÓN			
	Equipo	Técnico		
	TAG	Fecha		
	Motor Eléctrico	Luis Ramos		
	200-MK-2	21/01/2010		
Posición	Velocidad [mm/s]	Severidad Norma ISO 10816-3	Escala de Puntuación	Puntuación Obtenida
Lado Libre Vertical	4,65	Zona C	5-10	7
TOTAL (Máximo 20)				7

➤ Termografía

Otro de los planes de mantenimiento predictivo con los que cuenta la empresa Super Octanos C.A., es la medición de temperatura con cámara termográfica. El ENT acordó evaluar este aspecto de las pruebas y mediciones, con una valoración de cinco (5) puntos. El ENT decidió que las mediciones a evaluar fueran las realizadas en el cojinete lado libre del motor, ya que este es donde se presentan las vibraciones más altas y es también donde está ubicado el anillo de cortocircuito. Estas pruebas se realizarán con la cámara termográfica IR Flexcam Ti55. Para evaluar este aspecto el ENT decidió que la evaluación se hiciera con base en la escala que se muestra en el anexo E.

En la figura 4.41 se muestra una foto tomada con la cámara termográfica donde se señalan las máximas temperaturas en zonas seleccionadas de la fotografía.

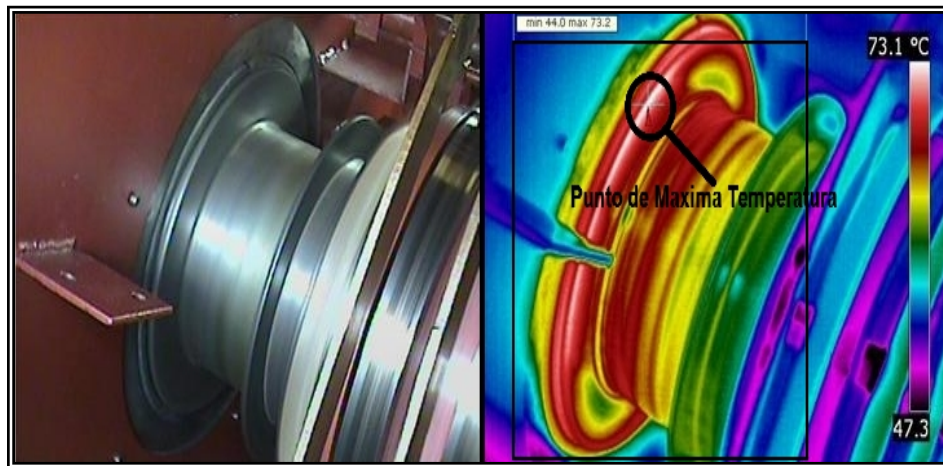




Figura 4. 41. Imágenes termográfica y normal del cojinete de superficie plana del lado libre.

Fuente: ThermaCAM QuickReport 1.1 ®.

Una vez tomada la fotografía, esta se descarga en la computadora y se analiza con el software ThermaCAM QuickReport 1.1 ®. Con las fotografías termográficas se puede obtener el valor de temperatura en cualquier punto de dicha foto. La máxima temperatura obtenida en la fotografía fue de 73,2 °C en el cojinete. En la tabla 4.33 se muestra la puntuación dada por el ENT, y el rango de temperatura optima en que pueden operar los cojinetes según el fabricante.

Tabla 4. 33. Puntuación asignada por ENT a la evaluación de la temperatura del cojinete lado libre del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia

 Super Octanos, C.A.	ANALISIS TERMOGRAFICO EN COJINETES			
	Equipo Motor Eléctrico	Técnico Neuman Rios		
	TAG 200-MK-2	Fecha 21/01/2010		
Posición	Temperatura [°C]	Valor Estándar dado por el fabricante[°C]	Escala de Puntuación	Puntuación Obtenida
Lado Libre	73,2	Desde 35 Hasta 85	0-5	1,18
TOTAL (Máximo 5)				1,18

Una vez evaluadas todas las pruebas y mediciones los resultados se muestran en la tabla 4.34.

Tabla 4. 34. Resultados de las Pruebas y Mediciones del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia

 Super Octanos, C.A.	PRUEBAS Y MEDICIONES		
	Equipo Motor Eléctrico		
	TAG 200-MK-2		
Tipo de Prueba y Medición		Puntuación	
Análisis de Lubricantes		10,64	
Análisis de Vibraciones		7	
Termografía		1	
TOTAL (Máximo 40)		18,64	

4.4.4.3. Edad del Equipo


Debido a que no se contaba con información del fabricante sobre la vida útil del equipo, el ENT con base en su experiencia proyectó la vida útil de este en un estimado de veinticinco (25) años. Según la información proporcionada por el departamento de Confiabilidad, el motor 200-MK-2 tiene veintiún (21) años de servicio. Dado que el parámetro beta “ β ” calculado en los Indicadores de Efectividad resultó ser 4,57, el motor 200-MK-2 se encuentra en la etapa de desgaste.

El ENT, en reunión, decidió calificar este factor con un máximo de veinte (20) puntos y para eso diseñó la tabla 4.35 que se basa, según la experiencia del ENT, en el tiempo en que el motor ha cumplido satisfactoriamente su función durante su vida.

Tabla 4. 35. Puntuación asignada por ENT según la evaluación de la edad del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.



EDAD DEL EQUIPO			
Equipo Motor Eléctrico			
TAG 200-MK-2			
Edad del Equipo	Años de Operación	Escala de Puntuación	Puntuación Obtenida
Mortalidad Infantil	0-8	0-10	
Operación Normal	8-20	10-5	
Desgaste	> 20	5-0	3
TOTAL (Máximo 10)			3

4.4.4.4. Medio Ambiente



La incidencia de este factor es la salinidad y los propios gases generados en la planta. El ambiente de salinidad generado por el mar, que está a poca distancia, produce corrosión en la carcasa del equipo disminuyendo la vida útil de este. Según el ENT este factor será evaluado con un máximo de diez (10) puntos. El puntaje será repartido tomando en cuenta los siguientes aspectos:

1. **Carcasa del motor, limpia y en buenas condiciones:** Indica un estado en el que la carcasa del motor se encuentra limpia y en buen estado físico, y será calificada con diez (10) puntos.
2. **Estado intermedio:** Estado en el que la carcasa del motor no está totalmente limpia, pero tampoco con corrosión, suciedad y desgaste de pintura, será calificada entre tres (3) y diez (10) puntos.
3. **Corrosión, suciedad y desgaste de pintura en la carcasa:** Si la carcasa tiene mugre, falta de pintura y puntos de corrosión, será calificada con tres (3) puntos.

En la tabla 4.36 se muestra la calificación dada al motor 200-MK-2 en lo referente al factor de medio ambiente.

Tabla 4. 36. Puntuación asignada por el ENT según la evaluación del medio ambiente.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	EFEITOS DEL MEDIO AMBIENTE		
	Equipo Motor Eléctrico		
	TAG 200-MK-2		
Condición Encontrada		Puntuación	
Carcasa del motor, limpia y en buenas condiciones		10	
Estado intermedio		3-10	4
Corrosión, suciedad y desgaste de pintura en la carcasa		3	
TOTAL (Máximo 10)			4

4.4.4.5. Carga de Trabajo

El motor 200-MK-2, fue seleccionado para operar en el sistema de compresión de aire de regeneración de la unidad 200 y suministrar la potencia necesaria para que el compresor succione aire de la atmósfera a razón de 395 toneladas métricas por hora (TM/h). Partiendo de lo anteriormente descrito y según la experiencia del ENT en la variación de la carga, el ENT acordó distribuir los diez (10) puntos del factor “carga de trabajo” como se muestra en la tabla 4.37.

Tabla 4. 37. Puntuación asignada por el ENT para la evaluación de la carga de trabajo del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

CONDICIÓN DE CARGA [TM/h]	PUNTUACIÓN
380-410	10
410-454	9-6
454-490	6-0

Revisando el software System 1®, que monitorea las variables de proceso de forma continua, se constató que la carga de trabajo fue de 471 TM/h (Ver figura 4.18). En la tabla 4.38 se muestra el resultado de la evaluación del factor carga de trabajo.

Tabla 4. 38. Puntuación dada por el ENT para el factor carga de trabajo.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	CARGA DE TRABAJO			
	Equipo Motor Eléctrico			
	TAG 200-MK-2			
Condición de Carga [TM/h]	Condición Encontrada [TM/h]	Escala de Puntuación	Puntuación Obtenida	
380-410		10		
410-454		9-6		
454-490	471	6-0	3	
TOTAL (Máximo 10)			3	

Con los factores y sub-factores hasta aquí obtenidos se ha conseguido un patrón de comparación que, aunque no es una norma matemática lograda, es muy confiable para fines prácticos. En este caso el ENT estuvo formado por especialistas relacionados con las operaciones y mantenimiento del 200-MK-2. En la tabla 4.39 se muestran los resultados de las condiciones encontradas.

Tabla 4. 39. Resultados de los factores relativos.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	FACTORES RELATIVOS		
EQUIPO :	Motor Eléctrico	TAG:	200-MK-2
FACTOR	PUNTUACION		
Inspección Visual	22,00		
Pruebas y Mediciones	18,82		
Edad del equipo	3,00		
Medio Ambiente	4,00		
Carga de Trabajo	3,00		
Total Confiabilidad (%)	50,82		

En síntesis, el Índice Relativo de Confiabilidad del motor 200-MK-2 es de 50,82% y es evidente que lo que más afecta a esta, son las altas vibraciones que registran las mediciones, se cree que las vibraciones son la causa de las fallas del anillo de cortocircuito, por tanto es necesario mantenerlo en constante monitoreo e implementar acciones en busca de reducir estas vibraciones.

4.4.5. Comparación de la Confiabilidad obtenida por el Método Estadístico de la Distribución de Weibull y por el Índice Relativo de Confiabilidad

El índice relativo de confiabilidad se estimó para una fecha determinada, esta fecha fue el 21 de Enero de 2010 que es la fecha aproximada después de sumar el TPEF a la fecha del último arranque del motor 200-MK-2. El historial de fallas del motor 200-MK-2 indica que el último arranque fue el 8 de Julio de 2009. Esto se hizo con el fin de comparar la confiabilidad obtenida por el método estadístico de Weibull en los Indicadores de Efectividad para un tiempo igual que para el Índice Relativo de Confiabilidad, y de esta manera determinar el error de comparación de ambos métodos.

Los valores de confiabilidad obtenidos fueron comparados y posteriormente se calculó el error relativo con la ecuación que se presenta a continuación.

$$\text{Error Relativo} = \frac{(\text{Confiabilidad_Weibull}) - (\text{Índice_Confiabilidad})}{(\text{Confiabilidad_Weibull})} * 100 \quad (4.1)$$

La tabla 4.40 muestra los valores de confiabilidad resultantes, tanto del análisis por el Método Estadístico de Weibull como por el Índice Relativo de Confiabilidad, con su error relativo.

Tabla 4. 40. Cuadro comparativo de la Confiabilidad obtenida por ambos métodos.

Fuente: Propia.

CONFIABILIDAD UTILIZANDO FACTORES Y EL CRITERIO DEL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO	CONFIABILIDAD PARA EL TPEF, UTILIZANDO EL HISTORIAL DE FALLAS	ERROR RELATIVO
50,82 %	51,04 %	0,43 %

Aunque es muy pequeña la diferencia de valores obtenidos por un método y otro, es posible que la diferencia sea debida a que para el cálculo de la confiabilidad por el modelo paramétrico de la distribución de Weibull se utilizan Tiempos de Operación o Tiempos Entre Fallas que no siempre son registrados correctamente, con respecto a la fecha y hora de parada o arranque del equipo y por las cifras significativas que se manejan durante los cálculos. Por otra parte el índice de confiabilidad es el producto de la totalización de factores como la inspección visual, pruebas y mediciones, edad del equipo, medio ambiente y carga de trabajo y los resultados altos o bajos que puedan tenerse provienen de una estimación, que depende básicamente de la experiencia del E.N.T. Observando el error relativo, se nota que en este caso es menor al 5%, considerándose como aceptable la variación entre un método y otro.

4.5. Evaluación técnica del comportamiento operacional del motor 200-MK-2.

La planta Super Octanos C.A., produce en promedio 80 toneladas métricas por hora (TM/h) de MTBE, la parada inesperada del motor 200-MK-2 en un promedio de Tiempo Fuera de Servicio de 20 horas, interrumpe la producción de 1600 toneladas métricas, esto genera un impacto económico considerable de aproximadamente 1.120.000 BsF. La evaluación técnica se hace con el fin de verificar las condiciones de funcionamiento del motor 200-MK-2 para de esta manera incrementar el desempeño en el comportamiento operacional, en función del diseño y el mantenimiento aplicado a éste y así evitar las paradas imprevistas. A continuación se analizan los enfoques, cualitativo y cuantitativo, utilizados para esta evaluación:

1. Desde el punto de vista cualitativo, la evaluación técnica esta basada en los resultados dados por el Análisis de Modos y Efectos de Fallas, y el Análisis Causa Raíz, que contempló las fallas potenciales de los subsistemas que conforman al motor 200-MK-2, y el análisis del modo de falla más común en el motor 200-MK-2. Con estas herramientas se encontró que una de las fallas potenciales del motor 200-MK-2 es la falla por fundición de las superficies de contacto del anillo de cortocircuito, el cual pertenece al subsistema eléctrico de arranque. También se encontró que una causa potencial de esta falla son las vibraciones del eje del rotor, esta vibración separa los contactos planos de los cilíndricos generándose un arco eléctrico que produce la fundición de las superficies de contactos. La falla por fundición de las superficies de contacto del anillo de cortocircuito podría ser generada por distintas fuentes, en el análisis causa raíz se propusieron algunas hipótesis en base a las cuales, a continuación, se señalan algunas recomendaciones a tomar en cuenta.

A. Instalación Inadecuada: Es posible que una instalación inadecuada sea la causa de solturas mecánicas o malos contactos en el anillo de cortocircuito, se recomienda contratar personal calificado por la empresa ANSALDO que es la fabricante del motor, para el armado del anillo y a su vez dictar talleres, charlas, etc, al personal técnico de Super Octanos C.A., encargado del mantenimiento del anillo de cortocircuito.

B. Vibración: La vibración produce el distanciamiento entre los contactos en donde se genera el arco eléctrico que funde a los mismos. Se ha comprobado, con el software Sistem 1® que monitorea continuamente la vibración relativa en el lado libre posición vertical del motor 200-MK-2 y la temperatura en la succión del compresor 200-K-2 (ver anexo G), que cada vez que ocurren cambios bruscos de temperatura en la succión del compresor, se generan picos de vibración en la

posición vertical del lado libre del motor 200-MK-2, lo que posiblemente a la larga produzca la falla del anillo de cortocircuito. Se recomienda realizar estudios más profundos acerca de cómo influye la temperatura de succión en las vibraciones del lado libre del motor y descartar errores por parte de la instrumentación involucrada. Por otro lado, debido a que no es objeto de esta investigación, se recomienda realizar investigaciones para encontrar otras variables que se puedan relacionar con las vibraciones en el lado libre del motor y de esta manera de acuerdo a los resultados implementar estrategias para minimizar estas vibraciones.

C. Sobre calentamiento de los Contactos:

1. Variaciones de Voltaje: Las subidas y bajadas de voltaje producen esfuerzos en el motor y en el anillo de cortocircuito, ya que este debe ajustarse a su velocidad nominal cada vez que aumente o disminuya el voltaje, se recomienda verificar el cumplimiento de los planes de mantenimiento preventivo y correctivo, referentes a las subestaciones y redes eléctricas externas, en aras de reducir la ocurrencia de estas variaciones de voltaje.

2. Variaciones de flujo en la descarga del compresor 200-K-2: Los cambios de flujo en la descarga del compresor también producen esfuerzo en el motor 200-MK-2, ya que aumentan o disminuyen el consumo de corriente del mismo, esto repercute directamente en el anillo de cortocircuito variando su temperatura. Se recomienda verificar el cumplimiento de los planes de mantenimiento impuestos a las líneas de descarga, válvulas, filtros, etc, del sistema de compresión de aire de regeneración, de manera de reducir las variaciones de flujo en la descarga del compresor.

D. Modelo de anillo de cortocircuito inapropiado: Es posible que el modelo de anillo de cortocircuito no sea el correcto para las condiciones de funcionamiento del motor 200-MK-2, se recomienda contactar al fabricante e indagar sobre la implementación de otro modelo de anillo.

2. El enfoque cuantitativo viene dado por el Principio de Pareto, los Indicadores de Efectividad y el Índice Relativo de Confiabilidad. Con este enfoque se encontró que la falla del equipo que más impacta en los tiempos fuera de servicio del motor 200-MK-2 es la fundición de las superficies de contacto del anillo de cortocircuito perteneciente al subsistema eléctrico de arranque. De los Indicadores de Efectividad se obtuvo un tiempo promedio entre fallas de 4740,76 horas, además la confiabilidad para el tiempo promedio entre fallas es de 51,04%, y se espera que el motor falle una vez en los próximos siete (7) meses, por otro lado, se encontró que el tiempo promedio fuera de servicio del motor 200-MK-2 es de 22,16 horas con una mantenibilidad de 57,07% para el TPFs, es decir que existen 57,07% de probabilidades de que el motor 200-MK-2 sea recuperado en las próximas 22,16 horas siguientes después de una falla. En cuanto a la disponibilidad operacional, el valor obtenido fue de 99% indicando que el 99% del tiempo en estudio, el motor 200-MK-2 estuvo a disposición del área de operaciones. Con el análisis estadístico de Weibull se obtuvo el parámetro de forma el cual indicó que el motor 200-MK-2 se encuentra en periodo de desgaste, con $\beta=4,57$, es decir que las fallas son más propensas a ocurrir a medida que pasa el tiempo y por lo tanto, para evitar las fallas se deben reacondicionar o cambiar los componentes antes de que se cumpla su vida útil en la cual aumentaría rápidamente su probabilidad de falla. El Índice Relativo de Confiabilidad basado en la experiencia del equipo natural de trabajo y en los factores relativos, fue de 50,82% y uno de los factores que influyó en este resultado de confiabilidad tan bajo fueron las pruebas y mediciones. Las pruebas de análisis de lubricante demostraron la presencia de alto contenido de sólido y gran cantidad de agua

presente pero no emulsionada en el aceite del subsistema de lubricación, para lo cual se recomienda el reemplazo parcial del lubricante y el uso de un equipo purificador. Con las mediciones de vibración se obtuvo un valor de velocidad de 4,96 mm/s en el cojinete lado libre posición vertical del motor 200-MK-2, el cual según la norma ISO 10816-3 lo incluye dentro de la zona C, donde el motor 200-MK-2 esta en un estado operativo limitado y deben tomarse medidas correctivas en la próxima parada programada. Por último, el análisis termográfico donde se encontró que la temperatura en el cojinete lado libre del motor 200-MK-2 fue de 73,2 °C cuando el límite de temperatura de operación en ese tipo de cojinete es de 85 °C, se recomienda realizar un seguimiento para ver la evolución del punto caliente usando la metodología y el personal más adecuado.

Una vez concluido el estudio del motor 200-MK-2, con todas las metodologías y procedimientos aplicados, se propusieron distintas actividades de mantenimiento para ser anexadas a los planes que actualmente se aplican al motor 200-MK-2, con el propósito de mejorar los Indicadores de Efectividad. Además, con el fin de aumentar la confiabilidad del sistema de compresión de aire, el ENT hizo énfasis en evaluar la alternativa de sustitución del motor 200-MK-2 por una turbina a gas que proporcione la misma potencia. A continuación se presenta la propuesta de sustitución del motor 200-MK-2 por una turbina a gas basada en el análisis del costo del ciclo de vida.

4.5.1. Propuesta de Reemplazo del Motor 200-MK-2 por una Turbina a Gas Basada en el Análisis del Costo del Ciclo de Vida

El parámetro de forma de la distribución de Weibull, con su valor de 4,57 indica que el motor 200-MK-2 se encuentra en periodo de desgaste, además del alto consumo eléctrico del motor, 13200 V, y la crisis energética que esta atravesando el país en estos momentos, la empresa Super Octanos C.A., ha decidido estudiar la

posibilidad de reemplazo del motor por una turbina a gas, basado en las pérdidas que generaría el motor comparadas con las de una turbina a gas.

Al momento de evaluar si es factible o no una inversión, bien sea un proyecto capital, una mejora menor, un cambio de tecnología, etc., no basta con presentar a las juntas gerenciales los valores de confiabilidad, tasa de fallas, etc., hay que hablar en términos de indicadores financieros. Es por ello que utilizando el indicador financiero Valor Presente Neto (VPN) se realizará un análisis del Costo del Ciclo de Vida (CCV) de los equipos, se analizarán las ventajas del motor 200-MK-2, actualmente en uso, y se compararan con las ventajas que ofrecería una turbina a gas, que proporcione aproximadamente la misma potencia que el motor.

4.5.1.1. Análisis de Reemplazo

Este análisis se hace con el fin de averiguar si el motor 200-MK-2, está operando de manera económica o si los costos de operación pueden disminuirse, adquiriendo un nuevo equipo.

Las alternativas que se analizarán son:

1. Continuar con el motor 200-MK-2 y realizar propuestas de acciones que mejoren el comportamiento operacional.
2. Sustituir el motor 200-MK-2 por una turbina a gas.

El ENT estableció utilizar los costos cuyo valor influirían en mayor medida a la hora de la elaboración de una propuesta de mejora. Los costos seleccionados fueron los siguientes:

1. Costos Iniciales (Ci)

Corresponde al monto o valor del desembolso que la empresa hará en el momento de contraer la inversión. En este monto se pueden encontrar: el valor del activo, la inversión diferida y el capital de trabajo. Para el motor 200-MK- no se tomará en cuenta los costos iniciales, ya que el equipo se encuentra instalado y funcionando.

2. Costos por Operación y Mantenimiento (COM)

- Costos Operativos Anuales: Incluye los costos por concepto de: labor (operaciones, ingeniería, procesos, mantenimiento), energía (electricidad, gas, agua, servicios), materiales, repuestos, almacenamiento, logística, contrataciones.
- Costo Anual de Mantenimiento: Incluye los costos por mantenimientos mayores/especiales y/o cualquier otro costo adicional.

3. Costos por Pérdida de Producción (CPP)

El costo total anualizado por pérdida de producción está constituido por las ganancias no generadas debido a la paralización de la producción. Para obtener esta relación fue necesario determinar la tasa de falla anual y el tiempo promedio fuera de servicio tanto del motor 200-MK-2 como de la turbina a gas. La tasa de fallas y el tiempo promedio fuera de servicio del motor 200-MK-2 se calcularon del historial de fallas, como se muestra en el apartado 4.4. Por otra parte la tasa de fallas para una turbina a gas se obtuvo del Manual Offshore Reliability Data Handbook (Ver anexo I) y el tiempo promedio fuera de servicio de la opinión de expertos de la empresa Super Octanos C.A.

La recopilación de los datos de costos de operación y mantenimiento del motor 200-MK-2 fueron proporcionados por el departamento de finanzas de Super Octanos C.A. En cuanto a los costos de inversión, operación y mantenimiento de la turbina a gas se requirió de la opinión de varios proveedores de turbinas a gas y contratistas especialistas en el mantenimiento de este tipo de equipo, entre ellas CFAS Enterprises Inc., Siemens, TurboCare C.A., y TURBIMECA. Los datos de costos fueron organizados a manera de una distribución triangular, ya que es la más comúnmente utilizada para caracterizar variables cuyo origen es la opinión de expertos. Además se establecieron la tasa de producción promedio anual y la ganancia neta por tonelada de MTBE, ambas proporcionadas por el Departamento de Producción de la empresa Super Octanos C.A., y que se utilizaron en el cálculo de los costos por pérdida de producción.

En la tabla 4.41 se presentan los datos de costos, la tasa de fallas y el tiempo promedio fuera de servicio, del motor 200-MK-2 y de la turbina que se utilizarán para el cálculo del Valor Presente Neto.

Tabla 4. 41. Costos, tasas de fallas y TPFS para el cálculo del VPN de las alternativas.

Fuente: Super Octanos C.A., opinión de expertos y OREDA.

Motor 200-MK-2				
Costos y Tasas de Falla	Distribución	Mínimo	Esperado	Máximo
Operación y Mantenimiento (MMUS\$/año)	Triangular	4,69	4,84	4,98
Tasa de fallas [fallas/años]	Valor Esperado		6,74	
Turbina a Gas				
Costo Inicial (MMUS\$/año)	Triangular	5,56	6,75	7,56
Operación y Mantenimiento (MMUS\$/año)	Triangular	1,41	1,68	1,96
Tasa de fallas [fallas/año]	Triangular	1,78	3,91	6,71
Tiempo Promedio Fuera de Servicio [Horas]				
Motor 200-MK-2		22,16		
Turbina a Gas (opinión de expertos)		71,2		

Para la estimación de las pérdidas de producción anuales tanto del motor 200-MK-2 como de la turbina a gas, la ecuación utilizada será la siguiente:

$$CPP = \lambda(t) * TPFS * PA * PVP \quad (4.2)$$

Donde:

CPP: costos por pérdida de producción [\$/año].

$\lambda(t)$: tasa de fallas, es una distribución de probabilidad, tanto para el motor como para la turbinas a gas [fallas/año].

TPFS: tiempo promedio fuera de servicio [año].

PA: producción anual de MTBE [TM/año].

PVP: precio de venta del producto [\$/TM].

En la tabla 4.42 se muestran los datos obtenidos del Departamento de Producción de Super Octanos C.A.

Tabla 4. 42. Datos de Producción y Venta del MTBE.

Fuente: Propia

TASA DE PRODUCCIÓN [TM/AÑO]	500.000
VALOR PRODUCCIÓN [\$/TM]	400

Para realizar el cálculo del VPN es necesario considerar la variación del valor del dinero en el tiempo así como el periodo contable donde ocurren los eventos que impactan en el desempeño económico de la instalación. El ENT estima, para el caso del motor 200-MK-2 que la vida útil restante será de seis (6) años, y para la turbina a gas se estima una vida útil de veinticinco (25) años. Puesto que los equipos tienen vidas diferentes, el horizonte de evaluación debe ser el mínimo común múltiplo de las vidas útiles de las alternativas, como se explica en el capítulo II, las cuales se muestran en la tabla 4.43. Para ciclos de vida posteriores al primero, el primer costo se repite en el año cero (0) del nuevo ciclo, que es el último año del ciclo anterior. Por otro lado, en este caso se utilizará una tasa de 10%, la cual es la tasa oficial de descuento de la empresa Super Octanos C.A.

Tabla 4. 43. Vida útil esperada de los equipos.

Fuente: Propia

EQUIPO	VIDA ÚTIL [AÑOS]	m.c.m
MOTOR	6	150
TURBINA	25	

El costo de ciclo de vida será la suma del costo inicial, más el valor presente de la suma del costo por operación y mantenimiento y el costo por pérdida de producción. Los modelos matemáticos utilizados para evaluar las dos alternativas en estudio, mediante el indicador VPN, son los siguientes:

Costo del Ciclo de Vida del Motor 200-MK-2:

$$CCV = -(COM_{MOTOR} + CPP_{MOTOR}) * \left[\frac{(1+i)^{150} - 1}{i * (1+i)^{150}} \right] \quad (4.3)$$

Costo del Ciclo de Vida de la turbina a gas:

$$CCV = -Ci - Ci * \sum_{25}^{125} \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] - (COM_{TURBINA} + CPP_{TURBINA}) * \left[\frac{(1+i)^{150} - 1}{i * (1+i)^{150}} \right] \quad (4.4)$$

Donde:

CCV: Costo del Ciclo de Vida.

Ci: Inversión Inicial, es una distribución de probabilidad.

n: Años de vida del proyecto (m.c.m de los años de vida de los equipos), “n” varia de 25 en 25 años.

i: tasa de descuento.

COM: Costos por operación y mantenimiento, es una distribución de probabilidad.

CPP: Costos por pérdida de producción, es una distribución de probabilidad.

En vista de que las ecuaciones están en función de variables que son distribuciones de probabilidad, se utilizará el software Crystal Ball® para realizar una simulación de todos los posibles escenarios, dados por las distribuciones de probabilidad, y obtener un valor del CCV_{VPN} esperado, para cada una de las alternativas.

4.5.1.2. Simulación con Crystal Ball®

Para la simulación se utilizará el software Crystal Ball®, una vez abierta una hoja de cálculo de Excel® y con Crystal Ball® activado, se procede de la siguiente manera:

1. Se definen los supuestos, es decir, las variables C_i , COM y CPP que serán distribuciones de probabilidad, en diferentes celdas de la hoja de cálculo.
2. Se introducen las ecuaciones 4.3 y 4.4 en una celda de la hoja de cálculo, luego se configura la celda como un Forecast, es decir, una celda-pronóstico cuya salida se desea simular y analizar. Estas ecuaciones son función de los supuestos definidos en el paso anterior. En la figura 4.42 se muestran los dos pasos anteriores.

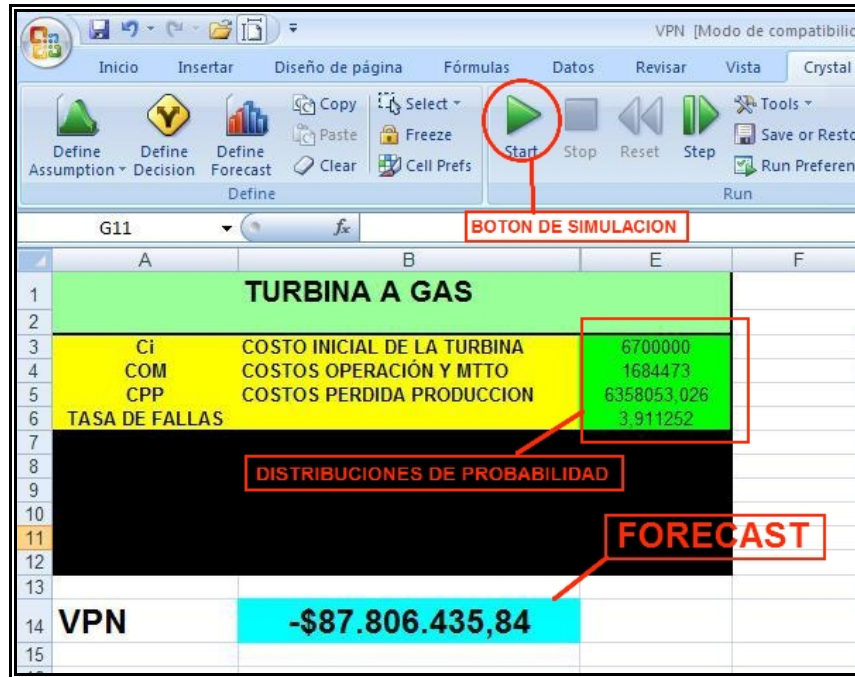


Figura 4. 42. Introducción de los supuestos y el forecast para la simulación.

Fuente: Microsoft Excel® y Crystal Ball®.

- Luego se presiona el botón de simulación. La simulación calculara los múltiples escenarios de los modelos dados por las ecuaciones 4.3 y 4.4 de manera repetitiva ejemplificando valores tomados desde las distribuciones de probabilidad de variables inciertas y así usar estos valores en las celdas.

Una vez introducidos los supuestos (variables Ci, COM y CPP que son distribuciones de probabilidad) y definidos los forecast (celda-pronóstico en Excel cuya salida se desea simular y analizar) para las dos alternativas, se procedió a la simulación la cual constó de 10.000 iteraciones. Los resultados para las alternativas se muestran en las figuras 4.43 y 4.44. Cada barra en el cuadro de pronósticos de las figuras 4.43 y 4.44 representa la posibilidad o probabilidad de que ocurra un egreso dado. El grupo de columnas cercanas al centro indica el nivel de egreso más probable.

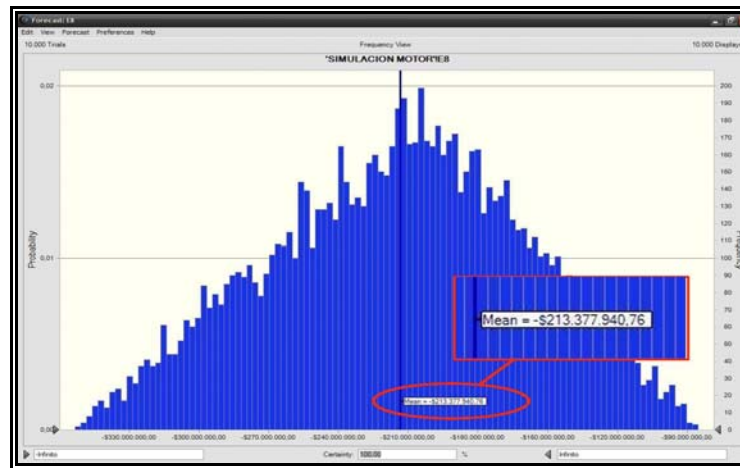


Figura 4. 43. Simulación motor 200-MK-2.

Fuente: Microsoft Excel® y Crystal Ball®.

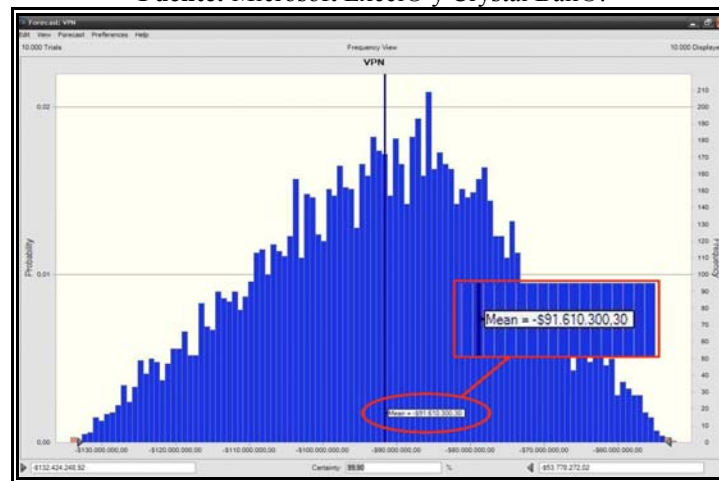


Figura 4. 44. Simulación turbina a gas.

Fuente: Microsoft Excel® y Crystal Ball®.

Los resultados del VNP esperado con su desviación estándar para ambas alternativas se encuentran en la tabla 4.44.

Tabla 4. 44. Montos probables de pérdida de dinero en dólares.

Fuente: Propia

ALTERNATIVA	VALOR ESPERADO [MMUS\$]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [MMUS\$]
MOTOR 200-MK-2	-213,38	55,35
TURBINA A GAS	-91,61	16,48

En la figura 4.43 aparece el resultado de la simulación del CCV del motor 200-MK-2, en estas condiciones continuar operando con el motor no es rentable desde el punto de vista de la empresa, ya que la posibilidad es de perder casi 353 millones de dólares como máximo, y 85 millones de dólares como mínimo, con un valor esperado 213,38 millones de dólares durante la vida que se espera que opere el equipo.

Para la turbina a gas, sus resultados se muestran en la figura 4.44, el Costo del Ciclo de Vida en esta circunstancia cambia de panorama, pues la simulación muestra que las pérdidas disminuyen como sigue: 134 millones de dólares como máximo, 52 millones de dólares como mínimo y un valor esperado de 91,61 millones de dólares.

En vista de que el Costo del Ciclo de Vida se desarrollo en base a los desembolsos que tendría que hacer la empresa en los próximos años al seguir operando con el motor 200-MK-2 o sustituirlo por una turbina a gas, el interés esta en la alternativa cuyo costo inicial, costos por operación y mantenimiento y costos por pérdida de producción sea mayor en términos numéricos, es decir menos negativo, la alternativa de “sustituir el motor por una turbina a gas” es la que presenta un menor egreso en el valor presente, tanto la media resultante como la dispersión son menores que la alternativa de seguir operando con el motor 200-MK-2.

4.6. Propuesta de acciones que mejoren el comportamiento operacional del motor 200-MK-2.

Tomando en cuenta los resultados de los Indicadores de Efectividad y del Índice Relativo de Confiabilidad, además de la opinión del ENT, se considerarán varias propuestas entre las que se encuentran: una propuesta de mejoras en el procedimiento de armado del anillo de cortocircuito en caso de falla y propuestas de mejoras a los planes de mantenimiento del motor 200-MK-2. Todo esto con el fin de

garantizar la continuidad, así como la confiabilidad y disponibilidad del equipo en el tiempo.

4.6.1. Propuesta de Mejoras en el Procedimiento de Desarmado y Emsamblaje del Anillo de Cortocircuito del Motor 200-MK-2.



A lo largo de esta investigación se pudo observar que el componente crítico del motor 200-MK-2 es el anillo de cortocircuito, y según el análisis causa raíz una de las causas de las fallas de este anillo podrían ser deficiencias en el ensamblaje del mismo.

La empresa Super Octanos C.A., aunque cuenta con procedimientos para las actividades de mantenimiento que se le realizan a este componente del motor 200-MK-2, existen actividades que se pueden mejorar. Por otro lado se deben considerar otros factores como, la poca supervisión de los trabajos de mantenimiento correctivo y preventivo, el desconocimiento y entendimiento de la ejecución correcta de los procedimientos y la falta de equipos para realizar estas actividades.

Se realizarón entrevistas informales al personal para conocer las inquietudes y sugerencias que aportarían para mejorar el procedimiento actual. De manera clara, sencilla y sistemática, en la tabla 4.45, se proporciona un procedimiento para un desarmado y ensamblado correcto del anillo de cortocircuito y que sirva de guía a los técnicos durante las intervenciones del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2.

Tabla 4. 45. Práctica operativa para el desarmado y ensamblado del anillo de cortocircuito del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia

 Super Octanos, C.A.		Técnico:	Fecha:	
		Equipo: Motor Eléctrico	TAG: 200-MK-2	
N°	ACTIVIDAD	PROCEDIMIENTO PARA EJECUTAR LA ACTIVIDAD	HERRAMIENTAS	OBSERVACIONES
1	Desenergización del motor	<ul style="list-style-type: none"> Colocar el selector de arranque, en la subestación eléctrica N° 1, en posición de disparo. Extraer el carro interruptor y colocar puesta a tierra. 	No aplica	
2	Desmontaje de la tapa principal	<ul style="list-style-type: none"> Quitar los tornillos de la tapa principal de la caja del anillo de cortocircuito. 	Juego de rache	
3	Desmontaje de los contactos planos accesibles	<ul style="list-style-type: none"> Aflojar la tuerca de seguridad, aflojar el tornillo hacia la derecha y sacar contrapeso. Retirar los contactos planos. 	Llave de 17 mm, destornillador de pala grande.	El tornillo se debe girar hacia la derecha
4	Desmontaje de los contactos cilíndricos accesibles	<ul style="list-style-type: none"> Aflojar los tornillos de los contactos cilíndricos con la llave allen preparada con adaptación. 	Llave allen 8 mm preparada con adaptación y torquímtero.	
5	Desmontaje de los contactos planos y cilíndricos restantes	<ul style="list-style-type: none"> Girar el eje con la llave de tubo para retirar los contactos planos y cilíndricos restantes. 	Llave de tubo de 40 pulgadas.	
6	Preparación de la superficie del anillo de cortocircuito	<ul style="list-style-type: none"> Lijar la superficie careada, limpiar con dieléctrico y trapo. Rectificar rosca de tornillos dañados. 	Lija 600, Chemcross, tarraja de 8 mm.	
7	Montaje de los contactos planos accesibles	<ul style="list-style-type: none"> Colocar los cuatro contactos planos de mayor a menor medida. Colocar las dos platinas de suplementos. Roscar el contrapeso girando el tornillo hacia la izquierda y ajustar alineando los contactos de manera uniforme. Colocar la tuerca de seguridad. 	Llave de 17 mm, destornillador de pala grande.	
8	Montaje de los contactos cilíndricos accesibles	<ul style="list-style-type: none"> Colocar los contactos cilíndricos y ajustar con el torquímtero. 	Llave allen 8 mm preparada con adaptación y torquímtero.	Calibrar el torquímtero en 11 Kg*m
9	Montaje de los contactos planos y cilíndricos restantes	<ul style="list-style-type: none"> Girar el eje con la llave de tubo para colocar los contactos planos y cilíndricos restantes. 	Llave de tubo de 40 pulgadas.	
10	Prueba de accionamiento.	<ul style="list-style-type: none"> Girar el motor reductor con la llave allen. 	Llave allen del equipo.	Girar hacia la derecha para entrada y hacia la izquierda para salida del anillo de cortocircuito.

4.6.2. Propuestas de Mejoras a los Planes de Mantenimiento del Motor 200-MK-2.

Actualmente, las políticas de mantenimiento en la prevención de fallas para el motor 200-MK-2 se basan en actividades de mantenimiento preventivo y correctivo, de acuerdo a las frecuencias sugeridas por el fabricante, realizándose a través de un conjunto de inspecciones, chequeos y análisis a intervalo de tiempos determinados. Para realizar esta propuesta, primeramente se analizaron cada uno de los modos de fallas registrados en la hoja de información (AMEF), fundamentando este análisis se hicieron preguntas de cómo debería actuar el equipo en operación, lo que pasaba realmente y lo que el fabricante recomendaba como una posible causa de falla.

Debido a que la empresa Super Octanos C.A., no maneja un valor de confiabilidad para sus equipos, el ENT decidió establecer una confiabilidad de 90% y calcular el tiempo necesario para lograr dicho porcentaje de confiabilidad. Utilizando la ecuación de confiabilidad de Weibull, el tiempo es el siguiente:

$$t = \gamma + \eta \left[\ln \frac{1}{R(t)} \right]^\beta \quad (4.5)$$

Sustituyendo los parámetros ya calculados tenemos el tiempo mínimo de intervención para mantener una confiabilidad de 90% en el motor 200-MK-2.



$$t = 813,03 + 4299,93 \left[\ln \frac{1}{0,90} \right]^{4,57} = 3441,01 \text{ _Horas} \approx 5 \text{ _meses}$$

Con la colaboración de todo el personal que de alguna manera está involucrado con el mantenimiento del motor 200-MK-2, y con ayuda del ENT se determinaron las

tareas propuestas, el personal que será el encargado de ejecutar dichas tareas, y la frecuencia inicial para cada tarea propuesta. A continuación se muestran las propuestas:

Tabla 4. 46. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento semanal del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.		
PROGRAMACION SEMANAL DE MANTENIMIENTO	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C	
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.	
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010	
LL: cojinete lado libre del motor. H: posición horizontal. V: posición vertical. LA: cojinete lado acople del motor. A: posición axial.			Pág. 1/2

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Condición encontrada	Departamento	Responsable de la acción
1	Detectar presencia de fugas de aceite	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Fugas Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
2	Chequear presión de entrada de lubricante en los cojinetes	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Presión LL <input type="checkbox"/> LA <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
3	Detectar ruidos	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
4	Chequear diferencial de presión en filtros del subsistema de lubricación	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Presión ΔP <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
5	Detectar presencia de fugas de agua	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Fugas Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
6	Monitorear vibraciones en cojinetes	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	LL <input type="checkbox"/> LA <input type="checkbox"/> H <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
7	Tomar lecturas de temperatura en cojinetes	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	LL <input type="checkbox"/> LA <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
8	Chequear consumo de amperaje	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad

Tabla 4. 46. Continuación de propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento semanal del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.		
PROGRAMACION SEMANAL DE MANTENIMIENTO	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C	
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.	
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010	
U: fase 1 V: fase 2	W: fase 3	Pág. 2/2	

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Condición encontrada	Departamento	Responsable de la acción
8	Inspección visual de la carcasa del motor eléctrico y caja reductora	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Severa <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
9	Pruebas de aislamiento en cables de alimentación	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	U a tierra [MΩ]= U vs V [MΩ]= V a tierra [MΩ]= V vs W [MΩ]= W a tierra [MΩ]= W vs U [MΩ]=	Electricidad	Técnico Electricista
10	Pruebas de aislamiento en devanado del estator	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	U a tierra [MΩ]= V a tierra [MΩ]= W a tierra [MΩ]=	Electricidad	Técnico Electricista
11	Resistencia del devanado del estator	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	U1-U2 [MΩ]= V1-V2 [MΩ]= W1-W2 [MΩ]=	Electricidad	Técnico Electricista
12	Mediciones de corriente	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	U [A]= V [A]= W [A]=	Electricidad	Técnico Electricista
13	Mediciones de voltaje	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	U-V [Volts]= V-W [Volts]= W-U [Volts]=	Electricidad	Técnico Electricista

Tabla 4. 47. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento mensual del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.		
PROGRAMACION MENSUAL DE MANTENIMIENTO	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C	
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.	
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010	
			Pág. 1/1

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Condición encontrada	Departamento	Responsable de la acción
1	Tomar muestra y realizar análisis del aceite lubricante	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: ___ Real: ___	Fugas Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
2	Realizar termografía en cojinetes y anillos de cortocircuito	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: ___ Real: ___	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
3	Inspección visual de corrosión en la carcasa	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: ___ Real: ___	Normal <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Severa <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
4	Inspección visual de la carcasa del motor eléctrico y caja reductora	Encendido <input checked="" type="checkbox"/> Apagado <input type="checkbox"/>	Estimado: ___ Real: ___	Normal <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Severa <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad

Tabla 4. 48. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento semestral del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.		
PROGRAMACION SEMESTRAL DE MANTENIMIENTO	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C	
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.	
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010	
			Pág. 1/1

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Condición encontrada	Departamento	Responsable de la acción
1	Inspeccionar elementos de fijación (tornillos, pernos, etc.)	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Ajustado <input type="checkbox"/> Desajustado <input type="checkbox"/>	Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
2	Verificar estado de las conexiones eléctricas	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Electricidad	Técnico Electricista
3	Limpiar caja de bornes	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —		Electricidad	Técnico Electricista
4	Verificar alineación	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Paralela <input type="checkbox"/> Angular <input type="checkbox"/>	Mecánica	Técnico Mecánico
5	Verificar estado de los anillos colectores	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Electricidad	Técnico Electricista
6	Verificar estado de los contactos de anillo de cortocircuito	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Desgaste Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Electricidad	Técnico Electricista
7	Limpiar filtros del sistema de lubricación	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —		Confiabilidad	Técnico en Confiabilidad
8	Verificar estado del reóstato	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Normal Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Electricidad	Técnico Electricista

Tabla 4. 49. Propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento en parada de planta del motor 200-MK-2.



Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.			
PARADA DE PLANTA PROGRAMADA	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C		
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.		
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010		
				Pág. 1/2

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Departamento	Responsable de la acción	Observaciones
1	Limpiar tubos del intercambiador de calor del subsistema de enfriamiento	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	
2	Limpieza de los bobinados y embarnizar si es necesario	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Electricidad	Técnico Electricista	
3	Engrasar todas las articulaciones del mecanismo de accionamiento del anillo de cortocircuito y escobillas	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	
4	Limpiar y aplicar Molikote al asiento del eje donde se desliza el anillo de cortocircuito	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	
5	Cambio de aceite	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Confiability	Técnico en Confiability	
6	Medir resistencia y aislamiento de bobinados	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Electricidad	Técnico Electricista	

Tabla 4. 50. Continuación de propuesta para las nuevas tareas de mantenimiento en parada de planta del motor 200-MK-2.

Fuente: Propia.

 Super Octanos, C.A.	PROPUESTA PARA LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPER OCTANOS C.A.		
PARADA DE PLANTA PROGRAMADA	EMPRESA: SUPER OCTANOS C.A.	REALIZADO POR: BR. JOSE A. TAYUPO.C	
EQUIPO: MOTOR ELECTRICO	SUPERINTENDENCIA: MANTENIMIENTO	REVISADO POR: ING. JOSE F. GARCIA. M.	
TAG: 200-MK-2	ÁREA DE OPERACIÓN: UNIDAD 200	FECHA: 21/03/2010	
			Pág. 2/2

N°	Actividad	Condición del equipo para realizar la actividad	Duración de la actividad	Departamento	Responsable de la acción	Observaciones
1	Reemplazar las escobillas	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Electricidad	Técnico Electricista	
2	Reemplazar cojinetes y sellos de laberinto	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	
3	Reemplazar contactos del anillo de cortocircuito	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Electricidad	Técnico Electricista	
4	Limpieza general y pintura	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	
5	Revisión y medición del eje	Encendido <input type="checkbox"/> Apagado <input checked="" type="checkbox"/>	Estimado: — Real: —	Mecánica	Técnico Mecánico	

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado del cumplimiento de los objetivos específicos planteados se obtuvieron las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

1. El diagnóstico de la situación actual del motor 200-MK-2, permitió conocer el funcionamiento de éste y de los subsistemas que lo conforman, además de sus variables de diseño y operacionales, en donde se encontró diferencias entre la carga de diseño y la carga operacional del motor 200-MK-2, de 395 TM/h a 471 TM/h, respectivamente, esto es debido al incremento de la carga por parte del Departamento de Producción con el fin de incrementar la producción de MTBE.
2. El Análisis de Modos y Efectos de Fallas permitió identificar los modos de fallas potenciales del motor 200-MK-2 y las causas asociadas a ellas, determinar las consecuencias de las fallas y reconocer las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial en el motor 200-MK-2.
3. La aplicación del Principio de Pareto al registro de fallas, permitió definir la falla crítica, que afecta la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad del motor 200-MK-2, resultando ser la falla del anillo de cortocircuito, la cual se consideró para la elaboración del Análisis Causa Raíz.
4. El Análisis Causa Raíz facilitó la deducción lógica de las distintas raíces físicas, humanas y latentes, de la falla por fundición de las superficies de contacto del anillo de cortocircuito, donde se consideraron varias hipótesis de las cuales la que toma más fuerza es la de vibración en el cojinete lado libre posición vertical del

motor 200-MK-2 originadas por variaciones en la temperatura de succión del compresor 200-K-2, produciendo estas el desgaste prematuro de los contactos del anillo de cortocircuito.

5. El cálculo de los Indicadores de Efectividad determinó el tiempo probable de ocurrencia de la próxima falla, que resultó ser de siete (7) meses, una confiabilidad para ese mismo tiempo de 51,04% y un tiempo promedio de recuperación después de una falla, de 22,16 horas, además, se encontró el periodo de vida en que se encuentra el motor 200-MK-2, periodo de desgaste, con $\beta=4,57$, en el cual la probabilidad de falla aumenta con la edad.
6. La estimación del Índice Relativo de Confiabilidad se hizo para la fecha en que es más probable que ocurra la falla, arrojando un valor de 50,82%, donde se evidenció que lo que más afectó a este valor fueron los resultados de las pruebas y mediciones, el análisis de vibraciones con un valor de velocidad de 4,96 mm/s en el cojinete lado libre posición vertical del motor 200-MK-2, dentro de la zona C según la norma ISO 10816-3, el análisis de lubricantes demostró la presencia de alto contenido de sólidos y agua no emulsionada y la termografía una temperatura en alarma de 73,1 °C en el cojinete lado libre del motor 200-MK-2, lo que disminuyó la calificación de este factor.
7. La Evaluación Técnica, reflejó de manera cualitativa y cuantitativa los efectos que producen las fallas, determinando el estado operacional del motor 200-MK-2, la importancia del anillo de cortocircuito y la forma en la que falla tomando en cuenta la mecánica de su funcionamiento, en esta evaluación se propusieron recomendaciones para atacar cada una de las hipótesis establecidas en el análisis causa raíz, además de ser la base para las propuestas de acciones de mantenimiento.
8. El análisis del Costo del Ciclo de Vida, demostró que la sustitución del motor por una turbina a gas es más beneficioso para la empresa en función de las pérdidas

esperadas, que seguir operando con el motor 200-MK-2, considerando los años de vida útil esperados de los equipos, por lo que queda abierta la opción para que la empresa pueda evaluar esta alternativa.

5.2. Recomendaciones

1. Registrar las fallas y los tiempos fuera de servicio de manera eficiente y detallada para facilitar el análisis del comportamiento de los equipos durante su vida útil.
2. Considerar el diseño de un anillo de cortocircuito, que se adapte mejor a las condiciones de operación, es decir un anillo que pueda evitar la separación de las superficies de contacto.
3. Realizar un estudio al motor con el fin de implementar otros puntos de medición de vibración, para así poder predecir la falla del anillo de cortocircuito.
4. Incentivar al personal de mantenimiento, a realizar los procedimientos y actividades planificadas para mejorar el desempeño y la eficiencia del motor.
5. Verificar si se cumple completamente el procedimiento de arranque del motor 200-MK-2.
6. Durante el procedimiento de armado del anillo de cortocircuito, verificar que los contactos planos y cilíndricos entren en “contacto” correctamente.
7. Realizar pruebas de diagnóstico como: Análisis de Corriente, Chequeo de la influencia del rotor y Perfil del Índice de Polarización, con las que se puedan verificar la condición eléctrica del motor 200-MK-2, cuando esta en operación.
8. Realizar un estudio de factibilidad de sustitución del motor 200-MK-2 por otro equipo.

9. Ejecutar una revisión de toda la instrumentación involucrada con el 200-MK-2.
10. Implementación inmediata del plan de acciones de mantenimiento y reemplazar el motor por la turbina a gas antes de finalizar el periodo de vida útil estimado para el motor.

BIBLIOGRAFÍA

1. GUTIERREZ, D. **“Evaluación Técnica del Comportamiento Operacional Basada en los Indicadores de Efectividad de los Aeroenfriadores de Procesos del Mejorador de Crudo PDVSA-Petrocedeño”** Tesis de Grado. Departamento de Mecánica. Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Venezuela (2009).
2. BUENO, L. **“Evaluación de los Indicadores de la Gestión de Mantenimiento Asociada a un Sistema de Sopladores Centrífugos para el Diseño de Programas de Mantenimiento”** Tesis de Grado. Departamento de Mecánica. Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Venezuela (2006).
3. MOSQUERA, L. **“Evaluación Técnica del Sistema de Transmisión de Potencia de los Aeroenfriadores, Sistema de Lubricación de los Sellos de Bombas y Sistema de Protección por Sobrevelocidad de Turbinas de Vapor”** Tesis de Grado. Departamento de Mecánica. Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Venezuela (2004).
4. IRESON, W Y OTROS. **“Handbook of Reliability Engineering and Management”**, Editorial McGraw-Hill Companies, Inc. EE.UU. (1996).
5. SUÁREZ, D. **“Guía Teórico-Práctica (Mantenimiento Mecánico)”**. Departamento de Mecánica. Universidad de oriente. Puerto La Cruz – Venezuela Octubre (2001).
6. YAÑEZ, M Y OTROS. **“Ingeniería de Confiabilidad y Analisis Probabilistico de Riesgo”**. Reliability and Risk Management, S.A. Venezuela (2004).
7. AMENDOLA, L. **“Modelos Mixtos de Confiabilidad”**, Editorial Universidad Politecnica de Valencia, España (2005).

8. CONFIMA & CONSULTORES. **“Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”**. Puerto la Cruz. Venezuela. (2007).
9. GARCIA, O. “El Analisis Causa Raiz, Estrategia de Confiabilidad Operacional”. Reliability World S.A. México (2005).
10. YAÑEZ, M Y OTROS. **“Probabilidad y Estadística Descriptiva”**. Reliability and Risk Management, S.A. Venezuela (2004).
11. HUERTA, R. **“Proceso de Análisis Integral de Disponibilidad y Confiabilidad como Soporte para el Mejoramiento Continuo de las Empresas”**. Reliability World S.A. México (2006).
12. HANLON, P. **“Compressor Handbook”**. Editorial McGraw-Hill Companies, Inc. EE.UU. (1996).
13. ORTEGA, J y RAMIREZ, D. **“Máquinas de Corriente Alterna”**. Editorial CEAD. España (1996).
14. OREDA, **“Offshore Reliability Data”**. Prepared by SINTEF Industrial Management Reliability. 4ta Edición. (2002)

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TITULO	“EVALUACIÓN TÉCNICA DEL COMPORTAMIENTO OPERACIONAL BASADA EN INDICADORES DE EFECTIVIDAD DEL MOTOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE” CASO: MOTOR 200-MK-2 DE LA PLANTA SUPEROCTANOS C.A., JOSE-EDO-ANZOÁTEGUI.
SUBTÍTULO	

AUTOR(ES)

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E-MAIL	
Tayupo C., José A.	CVLAC	V - 15.705.594
	e-mail	tayupo01@hotmail.com
	e-mail	
	CVLAC	
	e-mail	
	e-mail	

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Evaluación Técnica
Indicadores de Efectividad
Motor Eléctrico
Super Octanos C.A.
Panta

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

Área	Subárea
Ingeniería Mecánica	Sistemas dinámicos

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo de grado tiene como objetivo principal, realizar una Evaluación Técnica del Comportamiento Operacional basada en Indicadores de Efectividad del Motor de un Sistema de Compresión de Aire de la planta Super Octanos C.A., Jose-Edo- Anzoátegui, con el propósito de implementar actividades de mantenimiento que mejoren los Indicadores de Efectividad, y por ende la gestión del mantenimiento. El primer paso para la ejecución de esta evaluación fue la realización de un diagnóstico de la situación operativa, para conocer cómo debe trabajar y cómo esta trabajando actualmente el motor. A continuación, se realizó un Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) donde se establecieron las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y efectos de las fallas del motor 200-MK-2, seguidamente se utilizó la herramienta del Análisis de Pareto para determinar cual de todas las fallas impacta de mayor manera en el tiempo fuera de servicio del motor. Luego se procedió con el Análisis Causa Raíz (ACR), aplicando la técnica del árbol de falla, que permitió la identificación de las raíces físicas, humanas y latentes de la falla que más impacta en el tiempo fuera de servicio. Luego se calcularon los indicadores de efectividad que dieron cuenta mediante probabilidades estadísticas del estado de vida útil del motor 200-MK-2.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail						
	ROL	CA	AS	X	TU	JU	
Villarroel, Delia							
	CVLAC	V – 5.189.936					
	E-mail	deliavs@cantv.net					
Garcia, José							
	CVLAC	V – 11.418.115					
	E-mail	joseg@hotmail.com					
Griffith, Luis							
	CVLAC	CA	AS		TU	JU	X
	E-mail	Luisgmec@hotmail.com					
Rodriguez, Edgar							
	CVLAC	CA		AS		TU	JU X
	E-mail	rmedgar5@gmail.com					

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DÍA
2010	11	18

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO(S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Evaluación Técnica Motor.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: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente /Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

DERECHOS:

De acuerdo al Artículo N° 41 del Reglamento de Trabajos de Grado “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario”

José A. Tayupo C.

AUTOR

Prof. Delia Villarroel
ASESOR ACADÉMICO

Ing. José García
ASESOR INDUSTRIAL

Prof. Luis Griffith
JURADO PRINCIPAL

Prof. Edgar Rodríguez
JURADO PRINCIPAL

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS:

Prof. Delia Villarroel