



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
TRABAJO DE GRADO



**PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL
DISTRITO FURRIAL, PDVSA**

Autora:

Jhessica José Mejias Rivas

Tutor Académico:

MSc. Ing. Iván J. Turmero A.

Tutor Industrial:

Ing. Douglas Arias

CIUDAD GUAYANA, NOVIEMBRE DE 2014



**PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL
DISTRITO FURRIAL, PDVSA**



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
"ANTONIO JOSÉ DE SUCRE"

VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE GRADO

**PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL
DISTRITO FURRIAL, PDVSA**

Trabajo de Grado que se presenta ante el Departamento de Ingeniería Industrial de la UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniera Industrial.

AUTORA: Jhessica José Mejias Rivas

C.I.: 20.808.692

MSc. Ing. Iván Turmero

Tutor Académico

Ing. Douglas Arias

Tutor Industrial

CIUDAD GUAYANA, NOVIEMBRE DE 2014

Mejias Rivas Jhessica José

“PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL DISTRITO FURRIAL, PDVSA.”

Págs. 191

Informe de Trabajo de Grado

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.
Vice-Rectorado Puerto Ordaz. Departamento de Ingeniería Industrial.

Tutor Académico: MSc. Ing. Iván Turmero A.

Tutor Industrial: Ing. Douglas Arias

Ciudad Guayana, Noviembre de 2014

Contenido: I. El Problema. II. La Empresa. III. Marco Teórico. IV. Diseño Metodológico. V. Diagnóstico. VI. Análisis y Resultados. Conclusiones. Recomendaciones. Bibliografía. Apéndices. Anexos.

Contiene un (1) CD: Estructura Taxonómica de las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ). Clasificación de Fallas por Sistemas, Sub-Sistemas y Equipos. Matriz de Cálculos de Criticidad. Plantillas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). Plan de Mantenimiento Propuesto



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
TRABAJO DE GRADO



ACTA DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, miembros del Jurado Evaluador designados por el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-Rectorado Puerto Ordaz, para examinar el Informe de Trabajo de Grado presentado por la bachiller **JHESSICA JOSÉ MEJIAS RIVAS**, portadora de la Cédula de Identidad N° **V-20.808.692**, titulado: **“PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL DISTRITO FURRIAL, PDVSA.”**, consideramos que este informe cumple con los requisitos exigidos para tal efecto y por lo tanto, lo declaramos **APROBADO**.

En Ciudad Guayana, a los tres días del mes de Noviembre de dos mil catorce.

MSc. Ing. Iván Turmero

Tutor Académico

Ing. Douglas Arias

Tutor Industrial

Ing. Natasha Alarcón

Jurado Evaluador

MSc. Ing. Jairo Pico

Jurado Evaluador

DEDICATORIA

A mi familia por ser lo más importante en mi vida

Mis padres Yina y Facundo

Mis hermanos Santiago y Samuel

Y a mi novio Joel

**Reciban este logro,
que es también de ustedes!**

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quiero agradecer a mis padres Yina y Facundo por ser siempre mis pilares y las personas que han dado todo lo que han podido por mi y por mis hermanos, estoy muy agradecida con Dios por darme a la familia que tengo, los amo.

Gracias a toda mi familia, abuelas, tías, tíos, primos que siempre estuvieron pendiente de mi, gracias por su apoyo, los quiero mucho.

Agradezco también a mi novio, mi compañero, mi amigo que durante todos estos años de carrera universitaria ha estado siempre dispuesto a brindarme su apoyo incondicional, a ti gracias por formar parte de las personas que me han ayudado a ser la persona que soy.

A los amigos que estuvieron a lo largo de toda la carrera, con los que compartí todas las exigencias que se nos presentaban, especialmente al “Equipo Luis”, sí! a ustedes!, Andrea, Eunice, Luis y Verónica, gracias por todo su apoyo, son los mejores, definitivamente no creo que hubiera podido tener amigos y compañeros mejores que ustedes, son lo máximo!!! Se les quiere mucho!

Gracias de igual manera a mis tutores, mi querido Tutor Académico Iván Turmero, gracias por toda su ayuda durante el desarrollo de mi pasantía y tesis; a mi Tutor Industrial Douglas Arias por darme todo el apoyo que necesite para el desarrollo de este trabajo durante toda mi estadía en la empresa, a ustedes gracias infinitas!

Mejias Rivas, Jhessica José (2014). **PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LAS MINIPLANTAS COMPRESORAS JUSEPÍN DEL DISTRITO FURRIAL, PDVSA.** Trabajo de Grado. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz. Departamento de Ingeniería Industrial. Tutor Académico: MSc. Ing. Iván Turmero. Tutor Industrial: Ing. Douglas Arias.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el diseño del Plan de Mantenimiento centrado en confiabilidad de las Miniplantas Compresoras Jusepín, lo que involucró el levantamiento del contexto operacional actual, el análisis de criticidad de la planta (utilizando el programa *Crystall Ball* para Simulaciones Monte Carlo de la Frecuencia de Fallas y Tiempos Fuera de Servicio) y el proceso del Mantenimiento Centrado en confiabilidad (MCC); la investigación es de tipo proyectiva de diseño de campo no experimental, enfocándose en la descripción y el análisis del proceso de compresión del gas natural y el mantenimiento, utilizando la observación directa, revisión bibliográfica y entrevistas no estructuradas. A través del diagnóstico de la situación actual (contexto operacional, histórico de fallas y análisis de criticidad) se determinaron los sistemas y sub-sistemas críticos de la planta (Sistemas de Compresión Centrífugo 3, 4 y 5) y aplicarles el MCC; de esta manera se plantearon las tareas de mantenimiento que logran mitigar o eliminar las fallas y así aumentar la confiabilidad operacional de los activos, finalmente se creó el plan de Mantenimiento con un total de 18 plantillas, determinándose que este genera una reducción del 72,71% en las horas-hombre requeridas para su ejecución en comparación con el plan actual.

Palabras Claves: Mantenimiento, Confiabilidad Operacional, Contexto Operacional, Taxonomía, Análisis de Criticidad, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), Plan de Mantenimiento.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	4
Planteamiento del Problema.....	4
Objetivo General.....	9
Objetivos Específicos	9
Justificación	10
Delimitación.....	10
CAPÍTULO II. LA EMPRESA	12
Reseña Histórica de PDVSA	12
Petróleos de Venezuela, S.A.....	13
Actividades que Realiza PDVSA	14
Objetivos de PDVSA	15
Ubicación de la Empresa.....	16
Estructura Organizativa de la Gerencia de Mantenimiento	18
Misión	20

Visión.....	20
Política de la Calidad.....	20
Objetivos de la Calidad.....	20
Cadena de Valor.....	21
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	22
Antecedentes de la Investigación.....	22
Bases teóricas.....	24
Mantenimiento.....	25
Niveles de Mantenimiento.....	29
Confiabilidad Operacional.....	30
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).....	32
Bases Legales.....	42
Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.....	42
Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN).....	43
<i>International Organization for Standardization (ISO)</i>	43
<i>Society of Automotive Engineers (SAE)</i>	43
Normativa de PDVSA.....	44
Glosario de Términos.....	45
CAPÍTULO IV. DISEÑO METODOLÓGICO.....	48
Tipo de Investigación.....	48
Diseño de Investigación.....	49
Unidades de Análisis (Población y Muestra).....	49
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	50

Procesamiento de la Información	52
Análisis de la Información.....	52
Procedimiento Metodológico	52
CAPÍTULO V. DIAGNÓSTICO	57
Descripción del Proceso de las Miniplantas Compresoras Jusepín	57
Capacidad de Diseño Vs Capacidad Actual	64
Cromatografía del Gas Natural de Diseño y Actual.....	65
Parámetros de Operación Actuales.....	66
Diagramas Entrada-Proceso-Salida	67
Sistemas y Sub-Sistemas.....	70
Equipos y Sub-Equipos	72
Histórico de Fallas de las MPCJ.....	76
Procedimiento del Análisis de Criticidad.....	79
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	107
Análisis del Contexto Operacional.....	107
Estructura Taxonómica de las Miniplantas Compresoras Jusepín	109
Análisis del Histórico de Fallas de las MPCJ.....	115
Resultados del Análisis de Criticidad.....	118
Análisis de los Resultados de Criticidad.....	135
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)	143
Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF).....	144
Tareas de Mantenimiento.....	149
Recursos Necesarios para la Ejecución de las Tareas Propuestas .	155

Plan de Mantenimiento de las Miniplantas Compresoras Jusepín	158
Reducción de H-H y Mejoras del Plan de Mantenimiento Propuesto	160
CONCLUSIONES	164
RECOMENDACIONES.....	166
BIBLIOGRAFÍA	167
ANEXOS.....	169
APÉNDICES	172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Ubicación Geográfica del Complejo Operacional Jusepín.	17
2.2. Esquema del Complejo Operacional Jusepín.	18
2.3. Estructura Organizativa Gerencia de Mantenimiento.....	19
2.4. Cadena de Valor de la Gerencia de Mantenimiento	21
3.1. Evolución del Mantenimiento	26
3.2. Sistema de Confiabilidad Operacional	31
3.3. Etapas de un MCC.....	33
3.4. Comportamiento del Desarrollo de una Falla Funcional	38
3.5. Niveles Jerárquicos de la Falla	38
3.6. Impacto Jerárquico de la Falla	39
3.7. Curva de la Bañera de Mantenimiento.....	40
5.1. Diagrama General de Una Miniplanta Compresora	59
5.2. Diagrama I Etapa de Compresión.....	61
5.3. Diagrama de la II Etapa de Compresión	63
5.4. Diagrama EPS de Miniplantas Compresoras Jusepín	68
5.5. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrífugo 3 (MPCJ-3)	69
5.6. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4)	69
5.7. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrífugo 5 (MPCJ-5)	70
5.8. Frecuencia de Fallas y TPFs de Compresores Centrífugos	87
5.9. Distribución Probabilística Frecuencia de Fallas Compresor 3	88
5.10. Definición de Pronósticos del Compresor 3	88
5.11. Frecuencia de Fallas y TPFs de Compresores	89
5.12. Pronóstico de la Frecuencia de Fallas del Compresor 3.....	89
5.13. Percentiles y Media de la Frecuencia de Fallas del Compresor 3	90
5.14. Pronóstico de la Frecuencia de Fallas del Depurador de Succión 3....	93
5.15. Percentiles y Media de Frecuencia Fallas del Depurador de Succión .	93

5.16. Matriz de Puntos de Criticidad	105
6.1. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Moderado)	120
6.2. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Optimista)	121
6.3. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Pesimista).....	122
6.4. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Moderado)	128
6.5. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Optimista)	129
6.6. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Pesimista)	130
6.7. Análisis de Modos y Efectos de Falla de Transmisor de Presión.....	145
6.8. Tareas de Mantenimiento por Modos de Falla Transmisor	150
6.9. Plan de Mantenimiento de Compresores Centrífugos	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3.1. Elementos de un Diagrama Entrada-Proceso-Salida.....	35
5.1. Especificaciones Motor Eléctrico Principal y Caja Multiplicadora.....	59
5.2. Especificaciones del Depurador General de Succión	60
5.3. Especificaciones del Depurador de Succión	60
5.4. Especificaciones del Compresor de I Etapa.....	60
5.5. Especificaciones del Enfriador de Gas I Etapa	61
5.6. Especificaciones del Depurador Inter-Etapa	62
5.7. Especificaciones del Compresor Centrífugo II Etapa	62
5.8. Especificaciones del Enfriador de Gas II Etapa	63
5.9. Especificaciones del Depurador de Descarga	64
5.10. Capacidad de Diseño vs Capacidad Actual de las MPCJ	65
5.11. Cromatografía del Gas de Diseño y Actual de MPCJ	66
5.12. Parámetros de Operación Actuales de las MPCJ	67
5.13. Equipos Principales de las Miniplantas Compresoras Jusepín	73
5.14. Equipos Desincorporados	74
5.15. Equipos y Sub-Equipos Fuera de Servicio.....	76
5.16. Frecuencia de Fallas y TFS por cada Miniplanta	77
5.17. Equipos Considerados en el Análisis de Criticidad	83
5.18. Ejemplo de Clasificación de Fallas	85
5.19. Falla Común por Equipos.....	91
5.20. Frecuencia de Fallas y TPFS por Opinión de Expertos	92
5.21. Frecuencia de Fallas y TPFS Simulados	95
5.22. Niveles de Producción por Sistemas	97
5.23. Impacto en Producción por Equipos	99
5.24. Costos de Reparación por Equipos	100

5.25. Impacto en la Seguridad por Equipos	102
5.26. Impacto Ambiental por Equipos	103
6.1. Códificación de los Sistemas de MPCJ	111
6.2. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-3.....	112
6.3. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-4.....	112
6.4. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-5.....	113
6.5. Frecuencia de Fallas Vs Consecuencias de Sistemas	119
6.6. Comparación de Ubicación de Sistemas en Escenarios Evaluados. ...	124
6.7. Índice de Criticidad por Sistemas para el Caso Moderado	125
6.8. Frecuencia de Fallas Vs Consecuencias de Sub-Sistemas.....	127
6.9. Comparación de Ubicación Sub-Sistemas en Escenarios Evaluados .	133
6.10. Índice de Criticidad por Sub-Sistemas para el Caso Moderado.....	134
6.11. Resultados del AMEF para cada Sistema de Compresión Centrífugo	146
6.12. Total de Tareas de Mantenimiento establecidas en el MCC.....	151
6.13. Tareas de Mantenimiento Predictivas.....	162

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
5.1. Frecuencia de Fallas Miniplantas Compresoras Jusepín.....	78
5.2. Tiempo Fuera de Servicio Miniplantas Compresoras Jusepín	79
6.1. Activos Clasificados en Nivel 6 de la Estructura Taxonómica.....	114
6.2. Activos Clasificados en Nivel 7 de la Estructura Taxonómica.....	115
6.3. Porcentaje de Frecuencia de Fallas MPCJ	116
6.4. Porcentaje de Tiempos Fuera de Servicio MPCJ	117
6.5. Porcentaje de Sistemas en los Niveles de Criticidad	123
6.6. Criticidad de Sistemas para el Caso Moderado	125
6.7. Porcentaje de Sub-Sistemas en los Niveles de Criticidad.....	132
6.8. Criticidad de Sistemas para el Caso Moderado	135
6.9. Fallas Funcionales por Sub-Sistemas.....	147
6.10. Modos de Falla por Sub-Sistemas	147
6.11. Consecuencias de Modos de Falla	148
6.12. Tareas de Mantenimiento del MCC	152
6.13. Niveles de Mantenimiento del MCC.....	153
6.14. Disciplinas Responsables de Tareas de Mantenimiento del MCC.....	154
6.15. Horas-Hombre de Planes de Mantenimiento	161

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XIX la función del Mantenimiento ha pasado distintas etapas, en los inicios de la revolución Industrial los propios operarios se encargaban de las reparaciones de los equipos, posteriormente, con el aumento de la complejidad de las máquinas se crearon los primeros departamentos de Mantenimiento. Las tareas en estas dos épocas eran básicamente correctivas. A partir de la Primera Guerra Mundial y sobre todo de la Segunda aparece el concepto de fiabilidad y los departamentos de Mantenimiento empiezan a buscar cómo prevenir las fallas, aparece el Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Proactivo y el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).

El MCC es una metodología que se encarga de optimizar la confiabilidad operacional de un activo (instalación, planta, sistema, subsistema y/o equipo) que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de dichos activos, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de fallas, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones; MCC permite identificar estrategias efectivas de mantenimiento que permitan garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de producción.

En el Distrito Furrrial de PDVSA existen diversas plantas que forman parte el proceso de producción de crudo, dependiendo de la criticidad de la instalación o planta la Gerencia de Mantenimiento adopta una determinada metodología para la elaboración de los Planes de Mantenimiento, dichas metodologías están contempladas en la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo”, en el caso de las plantas con un nivel de criticidad alto “A”, altos costos de mantenimiento,

sistemas complejos para establecer tareas de mantenimiento, entre otros, se busca la elaboración del plan en conjunto con la Gerencia de Confiabilidad Operacional para adoptar una metodología de confiabilidad.

El presente informe consistió en la elaboración de un Plan de Mantenimiento basado en el enfoque de confiabilidad para las Miniplantas Compresoras Jusepín en la Gerencia de Mantenimiento del Distrito Furrial, División Furrial, Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, PDVSA; dicha gerencia se encarga de mantener los activos de la corporación en condiciones operativas mediante la planificación, programación y ejecución del mantenimiento, con la aplicación de las mejores prácticas de mantenimiento clase mundial.

El Trabajo de Investigación está estructurado por capítulos de la siguiente manera:

- Capítulo I. El Problema: Donde se expone el problema objeto de estudio, los objetivos de la investigación, justificación y delimitación de la misma.
- Capítulo II. La Empresa: Contiene la descripción de la empresa, objetivos, misión, visión, política de la calidad, cadena de valor.
- Capítulo III. Marco Teórico: Se presentan las bases teóricas y legales de la investigación, así como el glosario de términos.
- Capítulo IV. Diseño Metodológico: Se describe la metodología detallando el tipo de investigación, diseño de la misma, población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y el procedimiento metodológico.
- Capítulo V. Diagnóstico: Se describe el contexto operacional de las Miniplantas Compresoras, su histórico de fallas, así como el

procedimiento utilizado para el establecimiento de la estructura taxonómica y el análisis de criticidad.

- Capítulo VI. Análisis y Resultados: Se presenta el análisis y los resultados obtenidos de la investigación de acuerdo a los objetivos planteados.

Finalmente se establecen las conclusiones y recomendaciones acordes al desarrollo de la investigación, las referencias bibliográficas utilizadas y por último los anexos y apéndices correspondientes.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En este capítulo se explica la problemática existente en las Miniplantas Compresoras del Distrito Furrial, División Furrial de la Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, PDVSA; así como los objetivos, justificación y delimitación de la investigación.

Planteamiento del Problema

Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) es una corporación propiedad de la República Bolivariana de Venezuela, creada por el Estado venezolano en el año 1975, en cumplimiento de la Ley Orgánica que Reserva al Estado, la Industria y el Comercio de Hidrocarburos (Ley de Nacionalización). Sus operaciones son supervisadas y controladas por el Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo (MENPET).

La Corporación PDVSA se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, de manera eficiente, rentable, segura, transparente y comprometida con la protección ambiental; con el fin último de motorizar el desarrollo armónico del país, afianzar el uso soberano de los recursos, potenciar el desarrollo endógeno y propiciar una existencia digna y provechosa para el pueblo venezolano.

PDVSA mediante su proceso de Normalización Técnica Corporativa establece las normas que deben cumplir sus negocios y filiales con la finalidad de promover la estandarización y homologación de sus procesos en

materia de Seguridad Industrial, Ambiente, Higiene Ocupacional, Diseño, Mantenimiento, Inspección, entre otros; todo dentro del marco legal y apegada a las normas nacionales e internacionales, lo que permite disponer de un amplia biblioteca de documentos que permiten soportar la ejecución de sus operaciones.

Dentro de las normas que la Corporación ha emitido se encuentra la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo” que establece los lineamientos y las metodologías que se deben seguir para elaborar los Planes de Mantenimiento de las diferentes instalaciones, plantas y/o equipos que forman parte de manera directa e indirecta del proceso productivo de crudo.

La Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo” establece tres (3) métodos de trabajo para la elaboración de planes, los cuales son:

- Utilizando metodologías de confiabilidad.
- Integrando las recomendaciones del fabricante, actividades de mantenimiento de equipos similares, recomendaciones de los especialistas de campo, entre otros.
- De acuerdo con las actividades y frecuencias establecidas para equipos similares o recomendadas por el fabricante.

La selección de la metodología para elaborar un Plan de Mantenimiento viene dada por las condiciones de la instalación, planta y/o equipo, tales como; el nivel de criticidad, los costos de mantenimiento, la incertidumbre sobre las actividades de mantenimiento y la existencia de sistemas complejos para establecer tareas de mantenimiento.

En el Distrito Furrial de PDVSA existe un conjunto de instalaciones, plantas y/o equipos que cumplen una función muy importante en el proceso productivo para lograr el cumplimiento de las metas de producción y apalancar los objetivos de la nación, por esta razón se hace necesario que las instalaciones que presenten gran impacto en el proceso productivo y características críticas como alto número de acciones de mantenimiento correctivo, altos costos de mantenimiento preventivo y dificultad para establecer tareas de mantenimiento cuenten con Planes de Mantenimiento bajo alguna metodología de confiabilidad con el principal objetivo de que los activos cumplan con el desempeño deseado, costos, seguridad y regulaciones ambientales establecidas.

Específicamente en el Complejo Operacional Jusepín se tienen las Miniplantas Compresoras de gas que tienen la función principal de procesar el gas de media presión (120 psig) procedente de los módulos de producción que permite mantener la producción de crudo del Distrito Furrial, PDVSA.

El gas se distribuye equitativamente en tres Miniplantas, aproximadamente 50 MMPCND en cada una. En la primera etapa de compresión se eleva la presión desde 120 hasta 500 psig y en la segunda etapa se eleva la presión hasta 1300 psig. El gas descargado se enfría y se lleva al depurador de descarga, para finalmente ser enviado al sistema de distribución de gas, desde donde puede ser transferido a la Planta de Extracción Jusepín (para deshidratación y posterior extracción de condensados de gas), Complejo “Muscar”, ZIMCA, IGF y los Pozos Inyectores de gas Jusepín.

Por lo explicado anteriormente las Miniplantas Compresoras Jusepín juegan un papel fundamental para lograr la producción de crudo del Distrito Furrial; estas deben cumplir su función el mayor tiempo posible, es decir, deben tener un nivel de confiabilidad alto; sin embargo, durante los últimos

años se ha incrementado las frecuencias de fallas en los sistemas, subsistemas y/o equipos que las conforman, provocando que las paradas de los equipos sea más frecuente y se incremente la utilización de horas-hombre para reparar.

Debido a la situación que presentan las Miniplantas en cuanto a fallas e importancia para mantener producción, la Gerencia de Mantenimiento en conjunto con la Gerencia de Confiabilidad Operacional están requiriendo elaborar el plan de mantenimiento basado en el enfoque de confiabilidad (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) de las Miniplantas, dando respuesta así al requerimiento de la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 y de esta manera asegurar con la implementación del Plan de Mantenimiento que los equipos continúen realizando su función de acuerdo a las exigencias del contexto operacional actual.

Es necesario resaltar que las Miniplantas Compresoras Jusepín cuentan actualmente con un plan de mantenimiento preventivo, sin embargo, este no está elaborado por alguna metodología de confiabilidad. El Plan de Mantenimiento existente no tiene el contexto operacional bien definido; por lo que no hay una identificación correcta y detallada de los sistemas, equipos, piezas y elementos mantenibles; no se tienen identificados los modos y efectos de falla, y no se tiene establecido una correcta estructura de tareas de acuerdo con los requerimientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03 “Tipos y Niveles de Mantenimiento”; por ende, se puede decir que no existe confianza en el Plan de Mantenimiento existente y por los motivos explicados en párrafos anteriores se requiere la elaboración del Plan de Mantenimiento mediante la metodología “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)” como lo establece la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo”.

Una de las causas de la problemática existente en las Miniplantas Compresoras en cuanto a las fallas que están presentando con mayor frecuencia es que estas no cuentan con un Plan de Mantenimiento que garantice un alcance (definición de tareas a realizar para cada equipo, parte y/o componente; duración de la intervención, entre otros) efectivo para cada intervención de mantenimiento, evitando de esta manera que un determinado equipo, parte y/o componente deje de cumplir su función de forma imprevista, esto se debe principalmente a que el personal encargado de la elaboración de los Planes de Mantenimiento no ha realizado la identificación de sistemas, equipos, piezas y elementos mantenibles de acuerdo con el contexto operacional actual. Además, no se tiene un análisis de criticidad de los activos para identificar aquellos que son prioritarios en el sistema de mantenimiento y que son de alta mejorabilidad.

De continuarse sin la elaboración de un plan de mantenimiento basado en el enfoque de confiabilidad que garantice un alcance efectivo se afectaría el funcionamiento de las Miniplantas Compresoras, debido a que se incrementaría la frecuencia de fallas de los diferentes equipos que las conforman y como consecuencia se incrementa también el uso de recursos, tales como horas-hombre, equipos, materiales y servicios contratados; afectando de manera negativa la producción del Distrito y la Gestión del Proceso de Mantenimiento.

A partir de lo descrito anteriormente, se plantean las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los sistemas y/o equipos con mayor criticidad dentro de las Miniplantas? ¿Qué beneficios tendría la elaboración del plan de mantenimiento bajo el enfoque de confiabilidad en las Miniplantas Compresoras Jusepín? ¿Los beneficios serán percibidos a corto, mediano o largo plazo?

Objetivo General

Diseñar el Plan de Mantenimiento, Centrado en Confiabilidad, para las Miniplantas Compresoras Jusepín del Distrito Furrial, PDVSA.

Objetivos Específicos

1. Diagnosticar el contexto operacional actual de las Miniplantas Compresoras Jusepín.
2. Establecer la taxonomía de las Miniplantas Compresoras Jusepín hasta el nivel 7, de acuerdo con la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07 “Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (SGCM)”.
3. Efectuar el análisis de criticidad de los sistemas, sub-sistemas y equipos de las Miniplantas Compresoras Jusepín.
4. Plantear las tareas de mantenimiento por niveles, mediante la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) a los sistemas principales de alta criticidad, siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03 “Tipos y Niveles de Mantenimiento”.
5. Establecer los recursos requeridos (equipos, materiales, herramientas y horas-hombre) para la ejecución del Plan de Mantenimiento.
6. Crear el Plan de Mantenimiento para las Miniplantas Compresoras Jusepín.
7. Determinar la reducción de Horas-Hombre y mejoras del Plan de Mantenimiento.

Justificación

El desarrollo de esta investigación se justifica en que proporcionará al personal perteneciente a la Gerencia de Mantenimiento contar con un Plan de Mantenimiento que establece las tareas técnicamente factibles, que logran mitigar los modos de falla de los sistemas críticos de las Miniplantas Compresoras Jusepín para disminuir su frecuencia de ocurrencia, garantizar la continuidad operativa de cada Miniplanta y así asegurar la compresión de gas de 140 MMPCND para mantener la producción de crudo del Distrito Furrial de PDVSA.

El diseño del Plan de Mantenimiento centrado en confiabilidad adaptado a las necesidades actuales de la Corporación y a las condiciones de los activos permite además identificar las tareas para ser ejecutadas por el personal de mantenimiento y operaciones, así como también se determinan las causas reales de fallas disminuyendo sus consecuencias, se identifican las fallas que están ocurriendo hoy y las que pueden ocurrir mañana, para mejorar el desempeño de los sistemas, sub-sistemas y equipos y reducir los costos directos e indirectos; generando de esta manera un valor agregado a la Corporación de forma directa ya que se espera optimizar las horas-hombre invertidas anualmente en las actividades de mantenimiento que se realizan a cada Miniplanta Compresora.

Delimitación

La investigación se realizó en el Estado Monagas, en La Gerencia de Mantenimiento del Distrito Furrial, División Furrial, Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, PDVSA; durante un periodo de 24 semanas.

Abarcando un estudio que contempló la Elaboración de un Plan de Mantenimiento centrado en Confiabilidad, bajo la metodología de

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) que abarcó a las tres (3) Miniplantas Compresoras de Gas ubicadas en el Complejo Operacional Jusepín con el fin de realizar el levantamiento del contexto operacional actual, establecer los sistemas y sub-sistemas con mayor criticidad, identificar los modos y efectos de falla que estos presentan, así como establecer las tareas de mantenimiento que deben ser ejecutadas para atacar los modos de falla con su debida frecuencia y recursos necesarios, para finalmente generar el plan de mantenimiento.

CAPÍTULO II

LA EMPRESA

En este capítulo se presentan generalidades de PDVSA, como la reseña histórica, actividades que realiza, sus objetivos, ubicación; además se describe la estructura organizativa de la Gerencia de Mantenimiento, misión, visión, política de calidad, objetivos de la calidad y la cadena de valor.

Reseña Histórica de PDVSA

En el año 1825 se autoriza en Venezuela la primera concesión para explotación de petróleo otorgada por el Gobernador del Estado Zulia, General Jorge Sthuerland, a un norteamericano llamado Camilo Ferrand al cual no le fue posible técnicamente llevar a cabo el proyecto de explotación y la concesión fue revocada después de un año.

Para el año 1875 se produce un brote de petróleo en la hacienda “La Alquitrana” propiedad de Manuel Antonio Pulido, lo que da comienzo a la explotación comercial del petróleo de Venezuela a través de la primera compañía petrolera venezolana llamada Petrolía. Aún cuando el primer registro de producción de petróleo data de 1878 fue a partir de 1914 cuando se inició el desarrollo comercial del crudo.

Después de Petrolía las concesiones fueron dándose a un ritmo acelerado a tal punto que para 1914 se inicia la gran explotación de petróleo en el Estado Zulia, a través de la Caribbean Petroleum Company que pertenecía a la compañía holandesa-británica Shell; dicha explotación

petrolera comenzó en el pozo Zumaque I en el campo de Mene Grande. A partir de 1924 las empresas norteamericanas entraron en el negocio petrolero venezolano con mucha fuerza y la industria petrolera comenzó a abrirse.

Tras la nacionalización de la industria petrolera en 1975 se crea en 1976 Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) propiedad del Estado Venezolano la cual se reserva por razones de convención nacional todo lo relativo a la explotación del territorio nacional del petróleo, asfalto y demás hidrocarburos, al comercio interior y exterior, y a las obras que su manejo requiera. PDVSA es actualmente una empresa matriz propiedad de la República Bolivariana de Venezuela regida por la Ley Orgánica que reserva al Estado la industria y el comercio de los hidrocarburos; se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera del país bajo la guía y supervisión del Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo (MENPET).

Luego de más de dos décadas de actividades, PDVSA se ha constituido en una corporación de primera línea en el ámbito nacional e internacional; actualmente la empresa posee las plantas refinadoras más grandes del mundo que le otorga una posición relevante en el ámbito mundial por sus niveles de producción, reservas, capacidad instalada de refinación y de ventas.

Petróleos de Venezuela, S.A.

Petróleos de Venezuela es la corporación estatal de la República Bolivariana de Venezuela que se encarga de la Exploración, Producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, de manera eficiente, rentable, segura y comprometida con la protección ambiental.

Como se establece en la Constitución, la totalidad de las acciones de PDVSA pertenecen al Estado Venezolano, por lo actúa bajo los lineamientos trazados en los planes de desarrollo nacional y de acuerdo a las políticas, directrices y estrategias para el sector de los hidrocarburos, dictadas por el Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo.

PDVSA lleva adelante actividades en materia de exploración y producción para el desarrollo de Petróleo, gas, crudo liviano y pesado, producción y explotación de los yacimientos de carbón. Así mismo tiene la función de planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades de empresas operadoras y filiales, tanto en Venezuela como en el exterior.

Actividades que Realiza PDVSA

PDVSA es una empresa integrada con actividades operativas y de apoyo, de cuya integración y coordinación dependen los resultados de la empresa. Dentro de las actividades se tienen:

- **Actividades de Operación:** Son propias de las empresas petroleras: Exploración, producción, refinación, transporte, almacenamiento y comercialización de crudo y gas.
- **Explotación:** Comprende el estudio del suelo y subsuelo local y/o regional; adquisición, procesamiento e interpretación de datos geológicos, aerofotográficos, sísmicos y otros.
- **Perforación:** Esta operación consiste en diseñar y construir estructuras para la perforación, evaluación, selección y disposición de materiales y herramientas para la perforación convencional o direccional, preparación y supervisión de todos los detalles concernientes a cada

renglón del programa general de perforación, adquisición, procesamiento y evaluación de datos.

- **Producción:** Consiste en la evaluación y terminación de pozos, diseño, construcción y mantenimiento de instalaciones de producción en tierra firme y costa afuera; programa de disposición de la producción (agua, petróleo y gas); separación, almacenamiento, medición y transporte, estudio de yacimientos, reservas probadas, probables o posibles, producción primaria (natural y/o artificial: gas, vapor, inyección continua, alternativas de otros mecanismos).
- **Transporte:** Comprende el diseño y tendido de tuberías (troncales y ramales), oleoductos, gasoductos, poliductos, instalaciones para el recibo, almacenamiento y despacho de hidrocarburos, estaciones de bombeo y de compresión de gas, transporte terrestre, fluvial, lacustre y/o marítimo, funcionamiento y mantenimiento de instalaciones y terminales.
- **Actividades de Apoyo:** Brindan los servicios y asesorías requeridas para el logro de los objetivos corporativos. Están destinadas, dentro de las áreas de su competencia, a la formulación, desarrollo, aplicación de políticas estratégicas de sistemas, normas y procedimientos, tratando de velar por el cumplimiento de los objetivos de la empresa.

Objetivos de PDVSA

PDVSA es una empresa eficiente, que tiene objetivos estratégicos que van más allá de la mera rentabilidad, tales como:

- Redistribuir la riqueza del petróleo a la sociedad en general.

- Contribuir con propósitos claves de la política exterior venezolana como el fomento la cooperación integral con aliados estratégicos y la integración latinoamericana en un contexto de transición hacia la multipolaridad.
- Garantizar la seguridad energética, incluyendo el suministro doméstico de combustible.
- Fomentar el desarrollo socio-económico a través de la industrialización y políticas de equidad social.
- Promocionar la soberanía tecnológica y desarrollo de recursos humanos altamente capacitados y motivados.

Aunque los objetivos sin fines de lucro de PDVSA son sumamente importantes para los objetivos nacionales, estos no interfieren con su capacidad de producir en un nivel técnicamente eficiente, maximizando el valor total que teóricamente podría ser obtenido de sus recursos petroleros.

Ubicación de la Empresa

PDVSA está presente a lo largo y ancho de la geografía nacional, encontrándose en los estados: Falcón, Zulia, Lara, Barinas, Anzoátegui, Monagas, Sucre, entre otros. Para el mejor desarrollo y gestión la Corporación Energética Venezolana cuenta con negocios y filiales. Uno de sus negocios es Exploración y Producción (EyP), el cual esta dividido en Direcciones Ejecutivas de Producción de acuerdo con su distribución geográfica: Oriente, Occidente y Faja del Orinoco.

La Gerencia de Mantenimiento del Distrito Furrial, División Furrial, Dirección Ejecutiva de Producción Oriente de PDVSA cuenta con más de 541 trabajadores para realizar sus servicios en los distintos equipos e

instalaciones del Distrito Furrial, que están ubicadas en las áreas de Orocuai, Rusio Viejo, Jusepín y El Furrial. La oficina del Gerente de Mantenimiento del Distrito Furrial, está ubicada en el Complejo Operacional Jusepín, Edificio de Producción Furrial, ubicado a cinco minutos de la población de Jusepín, al norte del Estado Monagas, en la carretera nacional La Toscana y a 40 km. de la Ciudad de Maturín (ver figura 2.1).

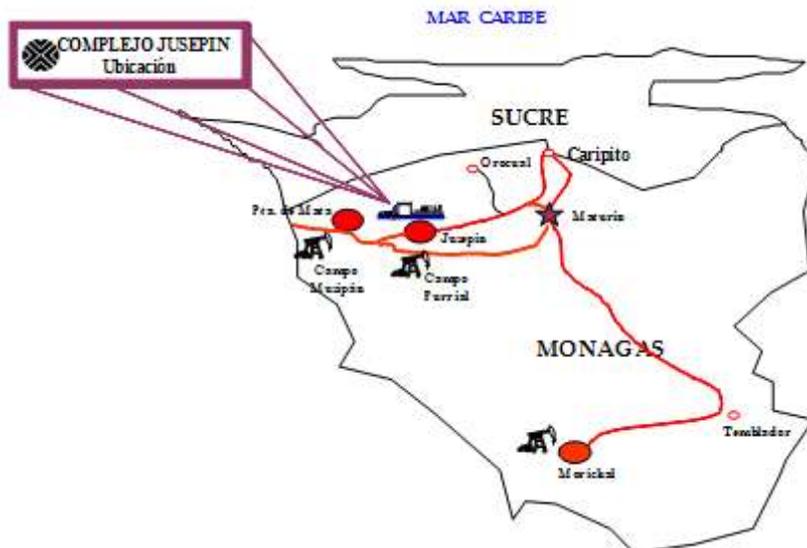


Figura 2.1. Ubicación Geográfica del Complejo Operacional Jusepín.

Fuente: Gonzáles (2003). Trabajo de Grado

Además se muestra en la figura 2.2 el esquema del Complejo Operacional Jusepín, el cual está constituido por cinco (5) plantas compresoras, tres (3) miniplantas compresoras, una (1) planta de deshidratación, 12 tanques de crudo, un (1) sistema contra incendio y nueve (9) módulos de producción.

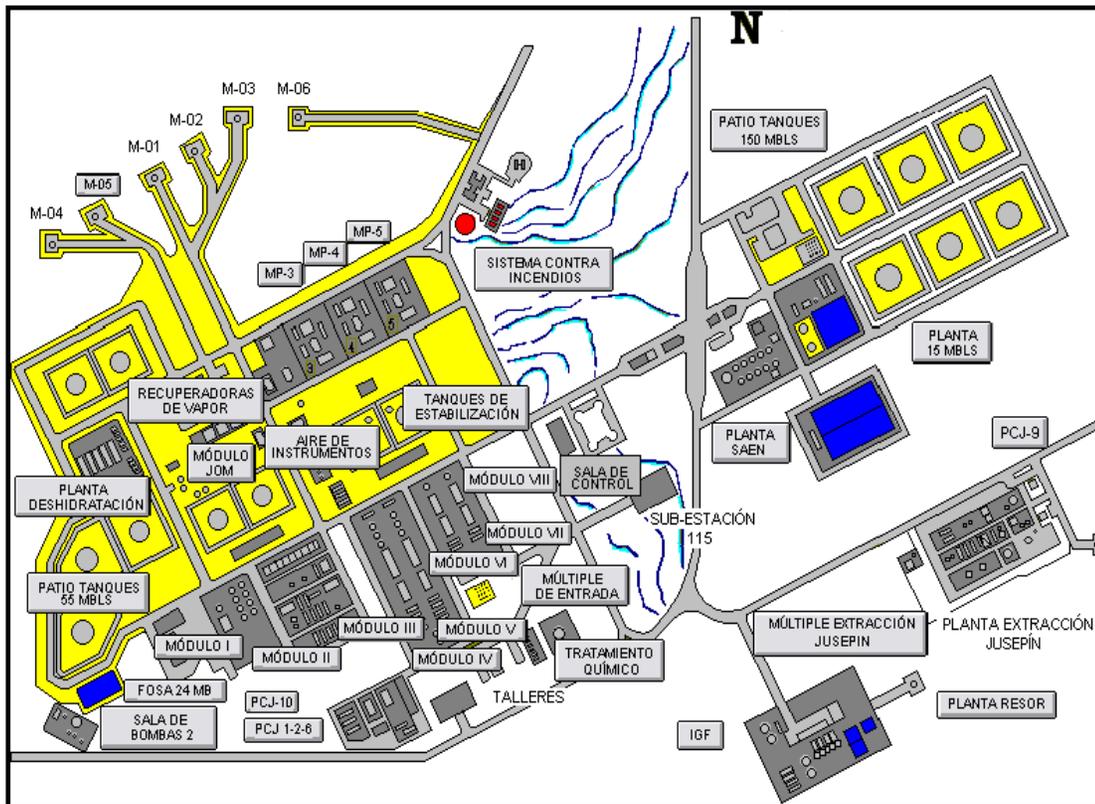


Figura 2.2. Esquema del Complejo Operacional Jusepín.
Fuente: Ingeniería de Confiabilidad. Contextos Operacionales

Estructura Organizativa de la Gerencia de Mantenimiento

El Organigrama de la Gerencia de Mantenimiento Distrito Furrial, División Furrial, Dirección Ejecutiva de Producción Oriente de PDVSA es de tipo funcional ya que enfoca los canales formales de la comunicación, la naturaleza lineal o asesoramiento del departamento, donde se ubican los jefes de cada grupo de trabajadores, y las relaciones que existen entre los diversos puestos de la empresa en cada departamento. En la figura 2.3 se muestra el organigrama de la Gerencia de Mantenimiento del Distrito Furrial, División Furrial, Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, PDVSA.

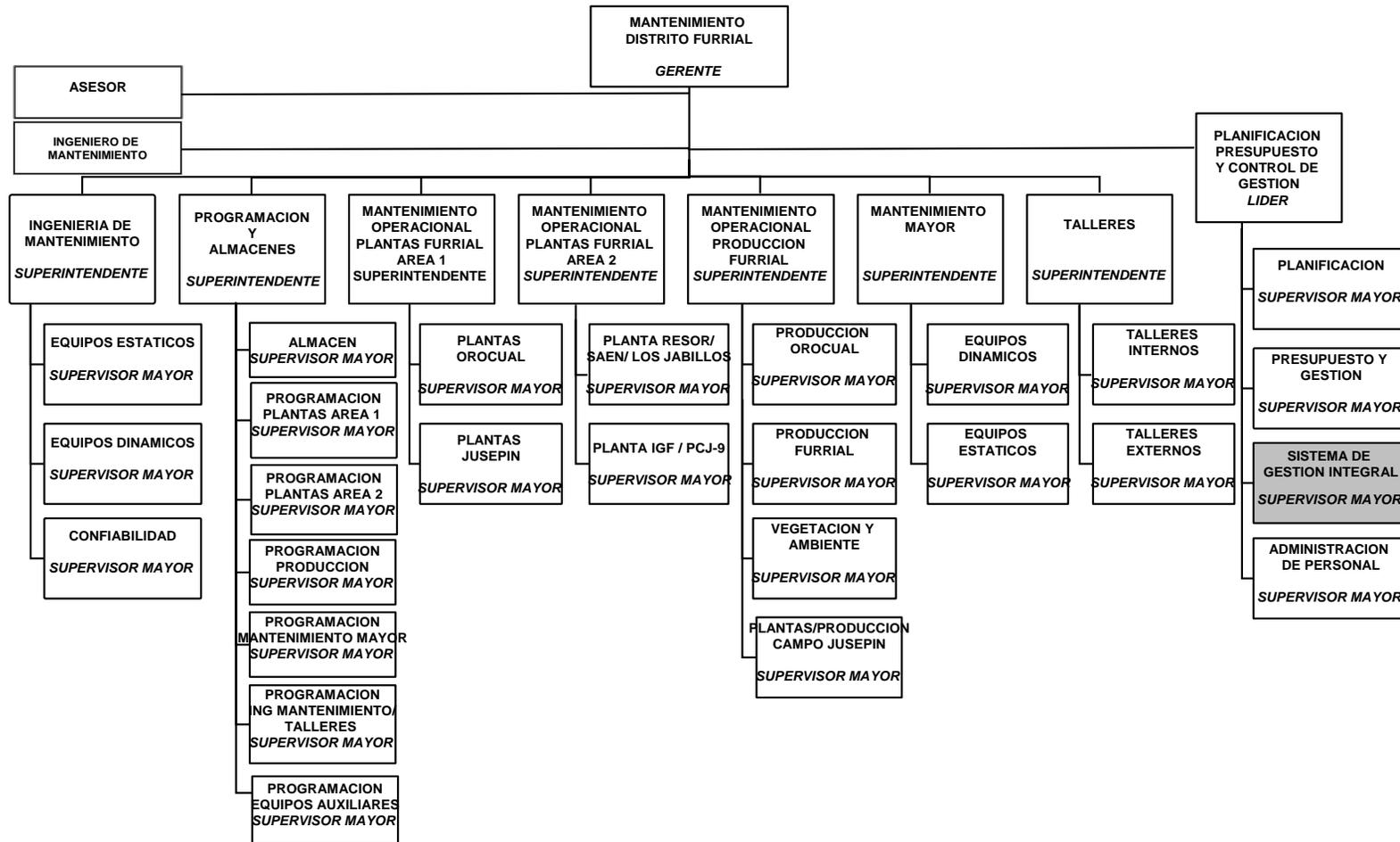


Figura 2.3. Estructura Organizativa Gerencia de Mantenimiento.

Fuente: PDVSA. MA-GC-001 “Manual de la Calidad”

Misión

Mantener los activos ubicados en el Distrito Furrial, División Furrial de PDVSA Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, en forma confiable y segura, mediante la aplicación de las mejores prácticas de mantenimiento clase mundial, con trabajadores altamente capacitados y motivados, con responsabilidad social, en armonía con el medio ambiente y contribuyendo a la creación del máximo valor para el accionista

Visión

Ser una organización líder mundial por su excelencia en el mantenimiento de los activos de la industria petrolera

Política de la Calidad

Planificar, programar y ejecutar el mantenimiento de los activos del Distrito Furrial de PDVSA Dirección Ejecutiva de Producción Oriente, basado en su condición, con un personal altamente calificado, mejorando continuamente los procesos y prestando un servicio en forma segura, al menor costo y de calidad, a fin de lograr la satisfacción de los clientes.

Objetivos de la Calidad

1. Realizar el servicio de mantenimiento a los equipos e instalaciones basado en su condición cumpliendo con todas las normativas aplicables.
2. Optimizar la gestión de mantenimiento de los activos a fin de garantizar su operatividad y vida útil.

3. Mantener un personal altamente calificado y motivado, proporcionándoles la formación requerida para un desempeño sobresaliente en sus labores.
4. Mejorar continuamente los procesos de la Gerencia con miras a lograr la excelencia en toda la organización a fin de obtener la satisfacción y reconocimiento de los clientes.
5. Impulsar actividades sociales a fin de apalancar el desarrollo del entorno.

Cadena de Valor

La cadena de valor mostrada en la figura 2.4 de la Gerencia de Mantenimiento muestra el modo en que se desarrollan los procesos de la Gerencia para generar valor al cliente.



Figura 2.4. Cadena de Valor de la Gerencia de Mantenimiento

Fuente: PDVSA. MA-GC-001 "Manual de la Calidad"

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se plantean los antecedentes, las bases teóricas y legales que sustentan el desarrollo de la investigación, así como el glosario de términos correspondiente.

Antecedentes de la Investigación

Para desarrollar este estudio, resulta de gran utilidad la revisión de investigaciones anteriores que aplicaron metodologías enfocadas en la confiabilidad, como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) para desarrollar un determinado Plan de Mantenimiento a una instalación o planta en específico, de donde se puede decir que estas investigaciones sirven de referencia para dar solución a la problemática planteada en el presente estudio, entre estas se tienen las siguientes:

Ramirez (2008) en su trabajo titulado “**Diseño de un Plan de Mantenimiento Basado en MCC al Área del sistema de Deshidratación/Desalación del Módulo de Producción y Emulsificación (MPE-1) del Distrito Morichal**” para obtener la Especialización en Gerencia de Mantenimiento tuvo como objetivo minimizar el número de fallas, así como la reducción de las consecuencias que dichas fallas producen sobre la productividad de las instalaciones. Para la evaluación el autor realizó levantamientos de campo, entrevistas con el personal de operaciones y mantenimiento de la estación. Además realizó una jerarquización de los diferentes equipos que conforman al sistema de Deshidratación y Desalación

de la MPE-1 donde se evidenció con base en su criticidad para el proceso, seguridad y ambiente, que las bombas y deshidratadores tienen grandes oportunidades de mejora ya que poseen el mayor índice de criticidad global del estudio. Mediante la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) se obtuvieron las actividades preventivas asociadas a los modos de falla evaluados para finalmente elaborar los planes de mantenimiento.

Por otra parte, **Figueroa (2010)** llevó a cabo un trabajo de investigación titulado **“Diseño de un Plan de Mantenimiento Eléctrico y de Instrumentación para las Grúas NKM Cambiadoras de Ánodos en la V Línea de CVG VENALUM”** en donde la finalidad primordial fue el mejoramiento del sistema de mantenimiento, optimizando los tiempos y recursos empleados para las reparaciones programadas y minimizando el tiempo y los costos para las paradas no programadas de las grúas. El estudio fue desarrollado como una investigación no experimental descriptiva, de tipo campo. Para ello el autor describió los subsistemas y equipos que componen las grúas NKM Cambiadoras de Ánodos, identificó a través de un análisis de Pareto los subsistemas con mayor número de fallas, evaluó la criticidad para los subsistemas de mayor frecuencia de fallas, analizó el historial de fallas de los subsistemas críticos del período Enero de 2009 hasta Julio de 2010, realizó un Análisis de Modos y Efectos de Fallas de los subsistemas críticos de las grúas y por último elaboró un programa de mantenimiento para las grúas NKM Cambiadoras de Ánodos y la estimación anual del programa de mantenimiento.

Centeno (2011) realizó también un trabajo de investigación titulado **“Diseño de un Plan de Mantenimiento para los Equipos PAYLOADERS KOMATSU de CVG VENALUM”** influyendo en la confiabilidad del activo. Para lo cual, este determinó la estructura del equipo y sus fallas potenciales, efectuó un análisis de Pareto y un análisis de criticidad, y determinó las

tareas de mantenimiento y niveles de inventario de repuestos que se deben tener en almacenamiento, considerando el resultado como un plan de mantenimiento fiable. La investigación se desarrolló en dos etapas, una primera fase descriptiva y una segunda proyectiva.

Todos los trabajos citados anteriormente están relacionados con la presente investigación, puesto que la temática en la cual se basan es muy similar en todos los casos, es decir, todas tuvieron como objetivo principal la generación de un Plan de Mantenimiento basándose en metodologías que involucran un análisis minucioso de los sistemas y equipos objetos del estudio para así recolectar información veraz que sustente la elaboración del Plan de Mantenimiento donde se establezcan las distintas tareas de Mantenimiento que deben ser ejecutadas por el personal de mantenimiento optimizando sus frecuencias según los requerimientos del contexto operacional.

Bases teóricas

Acevedo (2001), define las bases teóricas como "el conjunto de proposiciones teóricas interrelacionadas, que fundamentan y explican aspectos significativos del tema o problema en estudio, y lo sitúan dentro de un área específica o determinada del conocimiento". (p.139). Por lo que a continuación se describen las bases teóricas que sustentan el estudio, de manera que en el desarrollo de la investigación puedan ser manejados para una mayor comprensión del problema y permitan la obtención de los resultados esperados.

Mantenimiento

Es el conjunto de acciones que permite conservar o reestablecer un sistema productivo a un estado específico, para que pueda cumplir un servicio determinado. En la figura 3.1 se muestra la evolución del mantenimiento con el pasar de los años, desde que este fue implementado únicamente como acciones correctivas que restauraran el funcionamiento de un activo hasta involucrar la confiabilidad y riesgo en la Gestión del Proceso de Mantenimiento.

A continuación se definen diversos términos relacionados con el proceso de mantenimiento, tales como, confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad:

- **Confiabilidad (C):** Es la probabilidad de que un activo cumpla una función específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período de tiempo específico.
- **Disponibilidad (D):** Es la probabilidad de que un activo esté en capacidad de cumplir su misión en un momento dado bajo condiciones determinadas.
- **Mantenibilidad (M):** Es la probabilidad de que un activo pueda ser restaurado a condiciones normales de operación dentro de un periodo de tiempo dado, cuando su mantenimiento ha sido realizado de acuerdo a procedimientos preestablecidos.



Mantenimiento Preventivo

La Norma ISO 14224 “*Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*” define como mantenimiento preventivo a “toda acción ejecutada a intervalos de tiempo predeterminados o de acuerdo a un criterio pre-escrito, dirigida a reducir la probabilidad de falla o la degradación de una parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema”. Sin lugar a dudas el mantenimiento preventivo es la aplicación de un conjunto de acciones requeridas para disminuir a niveles tolerables la probabilidad de falla. Dichas acciones han de ser planificadas y periódicas, respondiendo a un ciclo de degradación del activo, a fin de evitar pérdidas de producción por eventos inesperados.

Mantenimiento Predictivo

También conocido como Mantenimiento Predictivo Basado en Condición es un conjunto de acciones y tareas que tienen la finalidad de obtener información para el diagnóstico de fallas que permitan tomar acción antes de la pérdida de la función del activo. Este tipo de mantenimiento se basa en el monitoreo de las variables indicadoras del deterioro de la condición del activo.

Es de suma importancia identificar el parámetro relevante de la condición el cual debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Debe ser una variable física medible.
- Tener la habilidad de caracterizar la condición del elemento.
- Tener la habilidad de cambiar continuamente durante la vida operativa.
- Tener la habilidad de describir numéricamente la condición del elemento.

Mantenimiento Detectivo

Es un conjunto de acciones y tareas que tienen la finalidad de identificar condiciones anormales, mediante una secuencia de pruebas que simulen las condiciones en las cuales los activos deben llevar a cabo una función específica, para verificar que es capaz de cumplirla. Está dirigido a la búsqueda de fallas ocultas, las cuales no se evidencian hasta que ocurra un evento de falla. Este tipo de fallas es característico de sistemas de instrumentación, seguridad y respaldo.

Es importante resaltar que estas tareas son particularmente útiles al momento de tratar de evitar fallas múltiples, que por lo general pueden resultar en fallas catastróficas. En otras palabras estas tareas están dirigidas a comprobar que un componente, equipo, sistema o proceso puede cumplir con su función cuando ésta es requerida.

Mantenimiento Correctivo

Según la Norma ISO 14224 *“Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment”* el mantenimiento correctivo “son todas las acciones ejecutadas después del reconocimiento de una falla, el cual busca hacer que la parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema quede en un estado en el cual pueda ejecutar la función para la cual es requerido”.

Este tipo de mantenimiento no se realiza bajo planificación y consiste en ejecutar la tarea de mantenimiento para restablecer la función del activo una vez ocurrida la falla o evento que represente la pérdida de la capacidad parcial o total del activo de realizar la función para la cual fue instalado.

Rediseño

Cuando existe la imposibilidad o dificultad para realizar tareas de mantenimiento para mitigar los riesgos de una falla, bien sea por condiciones de proceso o problemas de diseño, entonces se procede a realizar cambios en el diseño original, tendentes bien sea a mejorar las condiciones para realizar las tareas de mantenimiento o a reducir la frecuencia de fallas (mejoras en la confiabilidad). Estos cambios al diseño original de un activo se conocen como “rediseños”.

Las opciones de rediseño suelen ser costosas por lo cual se recomienda efectuar un análisis previo para verificar que la propuesta de rediseño es técnicamente factible, económicamente rentable y presupuestariamente viable.

Niveles de Mantenimiento

Son las categorías de jerarquización de actividades de mantenimiento basadas en esfuerzo y consecuencias de acuerdo al contexto operacional en el cual se desempeñe el activo. En el Anexo 1 se muestra un flujograma que permite visualizar de manera didáctica el proceso de clasificación de las actividades de mantenimiento por nivel.

- **Nivel 1:** En este nivel se describe el mantenimiento que involucra servicios básicos y las actividades de prevención, que no requieren desmontaje, apertura o parada del activo, así como registros de parámetros operacionales y la conservación de los aspectos de Seguridad Industrial, Higiene Ocupacional y Ambiente. Por ejemplo: todas las actividades dirigidas a la conservación externa, inspección visual, completación de niveles de fluidos de lubricación y/o enfriamiento de los equipos, orden y limpieza del activo en general.
- **Nivel 2:** En este nivel se describen todas las actividades de inspección no intrusiva, pruebas, ensayos no destructivos, mantenimiento de elementos que requieran o no paradas del activo y adicionalmente, monitoreo, registro de datos de mantenimiento y confiabilidad que permitan establecer la condición del elemento. Las paradas en este nivel no comprometen la continuidad operacional o el arranque del activo. Ejemplo: cambio de elementos consumibles.

- **Nivel 3:** En este nivel se describen todas las actividades de inspección intrusiva, pruebas, ensayos no destructivos especializados, ensayos destructivos y mantenimiento preventivo para restituir las condiciones operacionales que requieran, con o sin parada del activo. La parada en este nivel compromete la continuidad operacional o el arranque del activo.
- **Nivel 4:** En este nivel se describen en general las actividades de restitución parcial del activo llevándolo a las condiciones de diseño, que permitan prolongar su vida útil e impliquen parada. Por ejemplo: Fabricación y/o reparación de piezas, armado y reparación de conjuntos.
- **Nivel 5:** En este nivel se realizan todas aquellas actividades de restitución total de las condiciones originales de diseño, que impliquen parada del activo. Igualmente, reparaciones del Nivel 4 asignadas a este nivel por razones económicas o de oportunidad, pudiéndose referir a mejoras operacionales, ampliación de la capacidad instalada o incorporación de nuevas tecnologías. En el caso que el mantenimiento sea catalogado como una inversión se debe considerar lo establecido en el Manual de Proyectos de Inversión de Capital – MPIC y la asesoría directa del analista de finanzas.

Confiabilidad Operacional

Es la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico (ver figura 3.2). Para la ejecución de un programa de confiabilidad operacional es necesario

establecer una estrategia que permita la creación de un terreno clave para el éxito, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- Evaluación de situación en cuanto a tipo de equipos, modos de fallas relevantes, ingresos y costos, entorno organizacional, síntomas percibidos, posibles causas y toma de decisiones.
- Diseño de ruta para visualizar secuencia de metodología que mejor se adapten a las situaciones.
- Priorización de iniciativas con el propósito de estimar el impacto potencial de cada una de ellas.

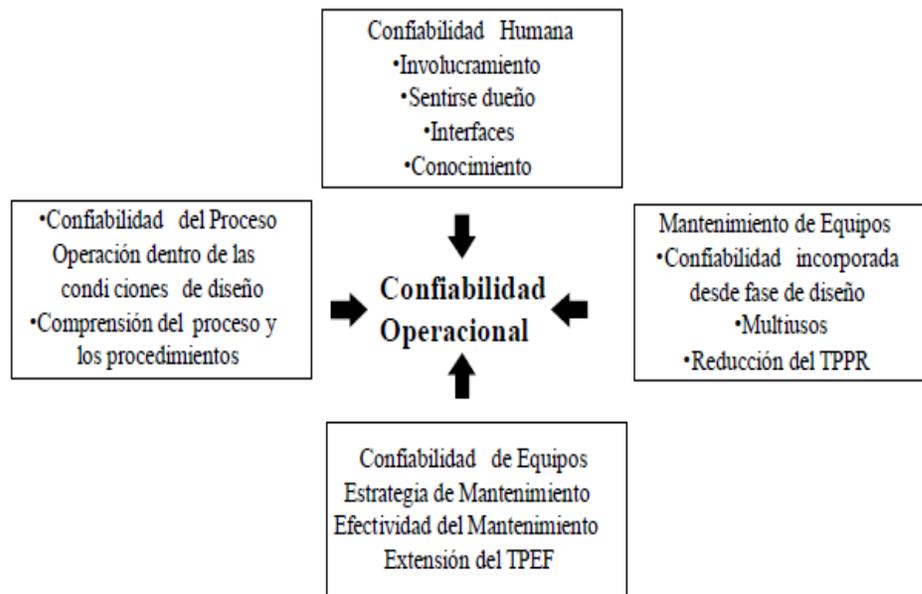


Figura 3.2. Sistema de Confiabilidad Operacional
Fuente: Ingeniería de Confiabilidad. Contextos Operacionales

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

MCC es un proceso analítico y sistemático basado en el entendimiento de la función de los sistemas y las fallas funcionales. El corazón de este proceso es una metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), que pudieran ocurrir en un equipo específico, evaluados en su contexto operacional. De este análisis se desprenden las posibles causas y mecanismos de fallas y en consecuencia pueden inferirse las actividades preventivas, predictivas, detectivas y/o correctivas requeridas para evitar las fallas y/o mitigar sus consecuencias, todo ello para garantizar la continuidad del proceso productivo con la mayor rentabilidad posible y niveles de riesgo tolerables. La Figura 3.3. muestra un flujograma en el que se señalan las diferentes etapas que involucra un estudio de MCC.

A lo largo de las cinco etapas mostradas en el flujograma de la Figura 3.3 el MCC contesta siete (7) preguntas claves que definen las tareas de mantenimiento que aplican a un equipo específico. Estas preguntas son:

- ¿Cuál es la función de un activo?
- ¿De qué maneras puede fallar?
- ¿Qué origina la falla?
- ¿Qué pasa cuando falla?
- ¿Importa si falla?
- ¿Se puede hacer algo para prevenir la falla?
- ¿Qué pasa si no se puede prevenir la falla?

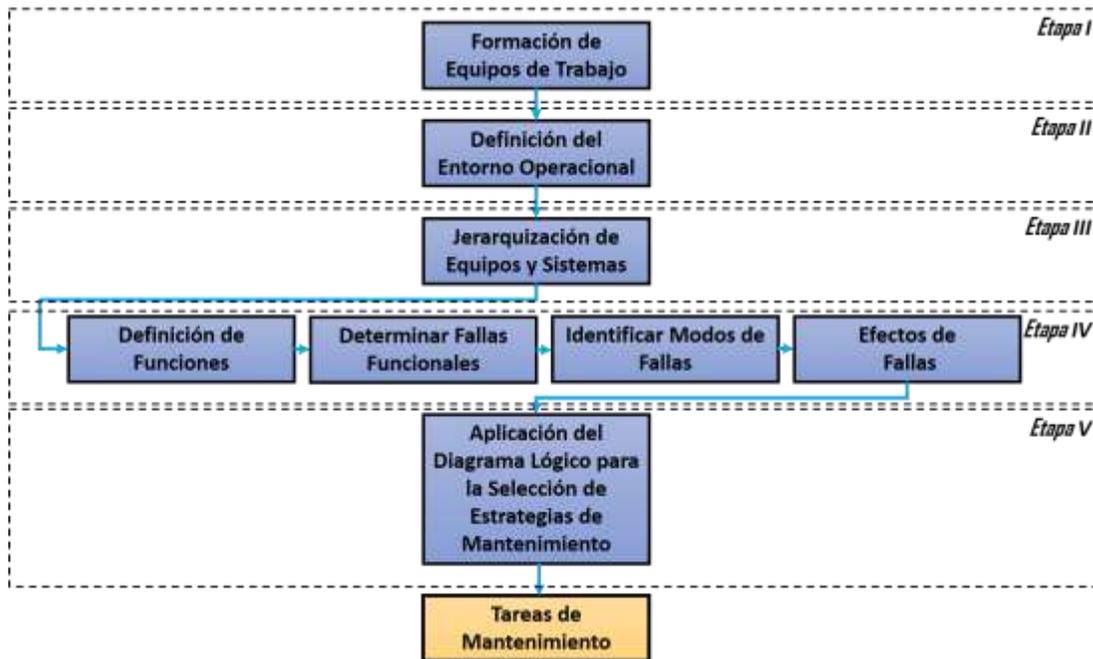


Figura 3.3. Etapas de un MCC
Fuente: R2M. Cuidado Integral de Activos

Etapa I: Formación del Equipo de Trabajo

La formación del Equipo Natural de Trabajo (ENT) tiene como objetivo realizar las actividades relacionadas a la aplicación sistemática de la Metodología para el Diseño de Planes de Mantenimiento Óptimos basados en Confiabilidad y Riesgo.

Dado que la metodología involucra diversas áreas del conocimiento, sus resultados se fundamentan en cómo se involucren las personas claves que posean el conocimiento y la pericia adecuada para el desarrollo del análisis, siendo necesaria la intervención de diferentes áreas del conocimiento como: operación, mantenimiento, seguridad, procesos, planificación y presupuesto.

Etapa II: Definición del Contexto Operacional

El “Contexto Operacional” puede entenderse como la serie de circunstancias y condiciones específicas en las que opera un determinado activo (requerimientos de operación y estándares de desempeño).

- **Análisis Funcional:** Se debe realizar un análisis funcional el cual consiste en definir las condiciones particulares en las que opera el activo y está estrechamente ligado al establecimiento del contexto operacional, el cual surge de una revisión de una identificación de todas las funciones del activo (primarias, secundarias, y de los dispositivos de protección).

En esta fase se debe generar el diagrama de procesos con la información disponible, lo cual facilita la visualización del sistema para su posterior análisis. El mismo consiste en identificar los servicios, insumos y controles que necesita el proceso (entradas) y los productos primarios, productos secundarios, desechos, controles y alarmas (salidas).

- **Diagramas EPS (Entrada-Proceso-Salida):** Para visualizar con más facilidad la definición de las funciones de un activo y alimentar las etapas posteriores del análisis, es recomendable definir los diagramas EPS a los sistemas a los cuales se les elaborará el plan de mantenimiento.

Los diagramas EPS persiguen plasmar la información referente al contexto operacional del activo, identificando sus entradas de procesos y salidas. En la tabla 3.1 se muestra un esquema general con los elementos que componen este tipo de diagrama.

Tabla 3.1. Elementos de un Diagrama Entrada-Proceso-Salida

Entradas		Proceso	Salidas	
Insumos	Materia prima a transformar.	Descripción simple de la acción a realizar por el sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Inyectar • Calentar • Enviar • bombear. 	Productos Primarios	Principales productos del sistema.
			Productos Secundarios	Derivados aprovechables resultados del proceso principal.
Servicios	Energía, agua de enfriamiento, aire de Instrumentos.		Desechos	Productos que se deben descartar.
			Servicios	En algunos casos se deben generar servicios a otra parte del proceso o a otro subsistema.
Controles	Entradas que permiten el control de sistema, como arranque-parada.		Alarmas, Controles	Señales que funcionan como advertencia o control para otros sistemas.

Fuente: R2M. Cuidado Integral de Activos

Etapa III: Jerarquización de Sistemas y Sub-Sistemas - Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad es una metodología para establecer jerarquías o prioridades de los activos, de acuerdo a su contribución al riesgo total asociado a un proceso, generando una estructura que facilita la toma de decisiones y el direccionamiento del esfuerzo y los recursos en las áreas y situaciones con base en el impacto en el negocio. Los productos del Análisis de Criticidad son:

- Lista jerarquizada por “criticidad” de los sistemas, sub-sistemas o equipos bajo análisis.
- Matriz de criticidad con la calificación del riesgo asociado a cada sistema o equipo analizado.

Etapa IV: Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)

El Análisis de Modos y Efectos de Falla es un enfoque metodológico basado en un proceso estructurado de identificación de las posibles formas de cómo puede fallar (modos de falla) un equipo; antes de que estas ocurran, con la finalidad de establecer las acciones que permitan mitigar el riesgo y sus efectos sobre el proceso de producción. Sus objetivos principales son:

- Reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y montaje, operación y mantenimiento de un equipo a partir de los componentes.
 - Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema.
 - Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la ocurrencia de la falla funcional.
- **Definición de Funciones:** El principal insumo para definir funciones es el análisis funcional realizado en las definiciones del entorno operacional de la etapa II del MCC. Las funciones pueden ser divididas en varias categorías las cuales se definen a continuación:
 - **Funciones Primarias:** Las funciones que constituyen las razones principales por las cuales el activo o sistema es adquirido.

- **Funciones Secundarias:** Son aquellas funciones que un activo físico o sistema tiene que cumplir aparte de su(s) función(es) primaria(s) a las cuales conciernen los problemas de protección, control, contención, confort, apariencia, eficiencia de energía e integridad estructural.
 - **Funciones Evidentes:** Una función cuya falla aislada se vuelve evidente al personal de operaciones bajo circunstancias normales.
 - **Funciones Ocultas:** Una función cuya falla aislada no se vuelve evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales.
- **Falla Funcional:** Es el estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para desarrollar una función específica a un nivel de desempeño deseado. Representa la pérdida de la función y existe al menos una por cada parámetro funcional establecido, pudiendo ser totales o parciales.

Las fallas funcionales responden a un patrón de comportamiento en un tiempo determinado que permiten la realización de una serie de actividades para reducir la probabilidad de pérdida de la función. En la figura 3.4 se muestra el comportamiento del desarrollo de una falla funcional.

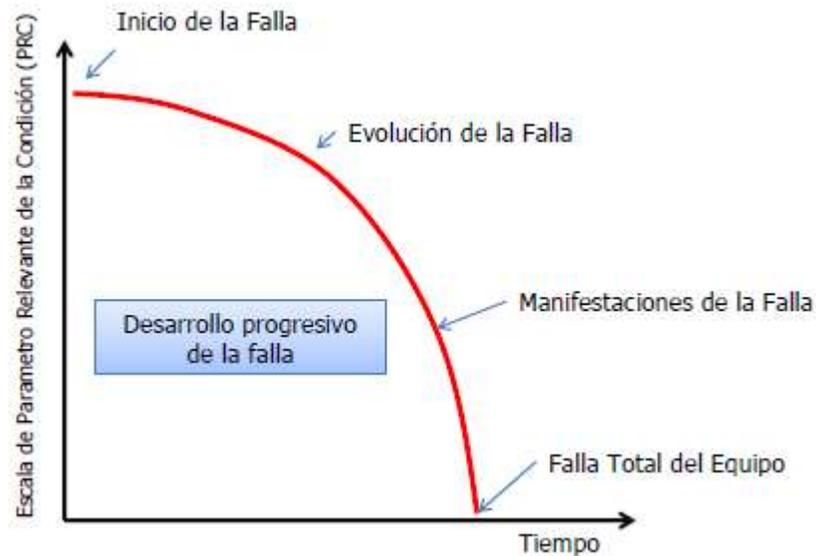


Figura 3.4. Comportamiento del Desarrollo de una Falla Funcional
Fuente: R2M. Cuidado Integral de Activos

En la figura 3.5 se muestra un esquema representando los niveles jerárquicos de una determinada falla, tomando como ejemplo un intercambiador de calor; además se muestra en la figura 3.6 el impacto jerárquico que genera la falla.

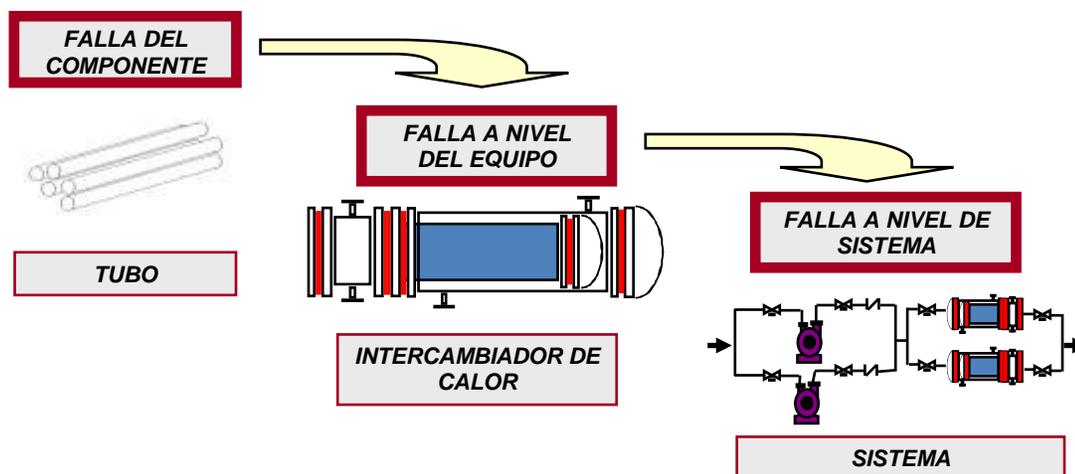


Figura 3.5. Niveles Jerárquicos de la Falla
Fuente: Ingeniería de Confiabilidad. Contextos Operacionales

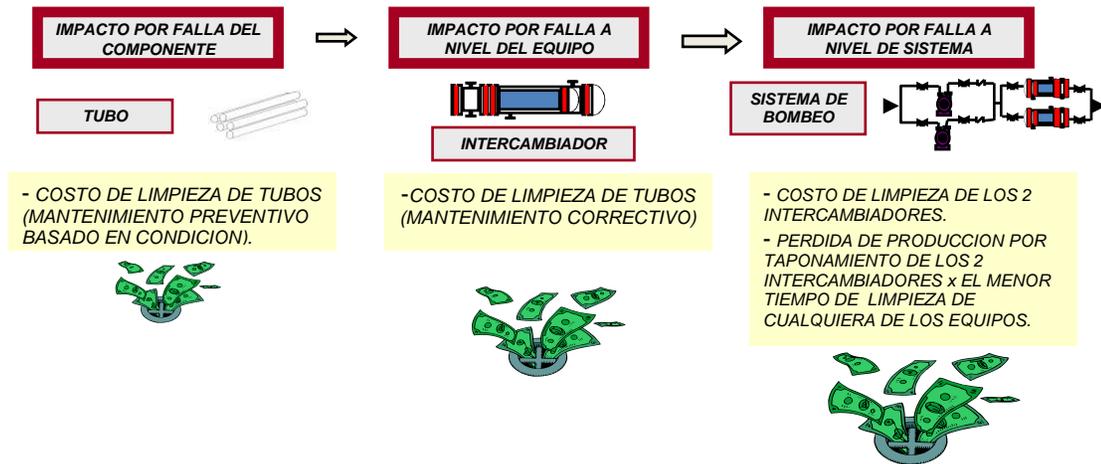


Figura 3.6. Impacto Jerárquico de la Falla
Fuente: Ingeniería de Confiabilidad. Contextos Operacionales.

- Identificación y Caracterización de Modos de Falla:** En esta fase se debe proceder a identificar las distintas formas como se puede manifestar un estado de falla (pérdida de función). Esta manifestación puede ser detectada por simple observación o con la utilización de sistemas de monitoreo de condición.

El modo de falla es la manera en el cual un componente sistema o proceso puede fallar para impedir una especificación de diseño. Es lo que se intenta evitar para impedir una falla, el modo de falla es lo que se tiene que reparar. Además, se identifica el patrón que sigue la falla de acuerdo a la figura 3.7 que muestra la Curva de la Bañera de Mantenimiento.

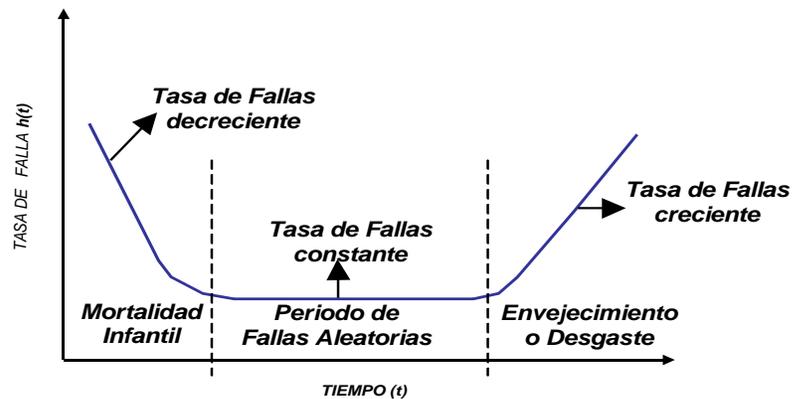


Figura 3.7. Curva de la Bañera de Mantenimiento
Fuente: Ingeniería de Confiabilidad. Contextos Operacionales.

- **Establecimiento de Efectos y Consecuencias de Falla:** Los efectos de falla están estrechamente relacionados a las consecuencias de las fallas puesto que en el efecto de la falla se establece “que pasa” y en las consecuencias de falla se establece “como y cuanto” afecta.

Las consecuencias de los modos de falla son más importantes que sus características técnicas. Esto también sugiere que la idea del manejo de fallas es anticipar o prevenir los modos de falla cuyo impacto al ocurrir sea mucho mayor que el costo de ocurrencia de la falla. Las consecuencias según su efecto al entorno se dividen en:

- Consecuencias Ocultas.
- Consecuencias para la seguridad.
- Consecuencias para el medio ambiente.
- Consecuencias operacionales.
- Consecuencias no operacionales.

Etapa V: Aplicación del Diagrama Lógico para la Selección de Estrategias y Definición de Tareas de Mantenimiento

- **Selección de Estrategias:** Se apoya en la lógica de selección que se llamada Diagrama de Decisión MCC para la selección de estrategias, este diagrama debe ser diseñado según los principios que provee la Norma SAE JA 1012 “*A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*”. El diagrama hace el recorrido a través de un grupo de preguntas y opciones que finalizan con la selección de una estrategia de mantenimiento, que puede ser:
 - Predictiva Basada en Condición.
 - Preventiva Cíclica Detectiva.
 - Preventiva Sustitución Basado en Tiempo.
 - Correctiva Operar Hasta la Falla.
 - Búsqueda de Falla.
 - Rediseño.

- **Planteamiento de Tareas de Mantenimiento:** Esta fase es complementaria a la anterior, a través de ella se formula una tarea específica según la estrategia de mantenimiento seleccionada para luego determinar una frecuencia de ejecución.

Cabe destacar que la función de la metodología Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es establecer las estrategias de mantenimiento que se deben aplicar en un activo, sugiriendo el “tipo de tarea” basado en la factibilidad técnica y en la valoración de la conveniencia de aplicarla o no, que se debe adoptar para mitigar las

consecuencias asociadas a los modos de falla que en este se puedan presentar, luego la descripción de la tarea y procedimientos representan pasos posteriores (no incluido en la metodología MCC).

Bases Legales

Según Villafranca (2002) “Las bases legales no son mas que se leyes que sustentan de forma legal el desarrollo del proyecto” explica que las bases legales “son leyes, reglamentos y normas necesarias en algunas investigaciones cuyo tema así lo amerite” (p.68); es decir, las bases legales dan el respaldo a la investigación en cuanto a normativa se refiere, para estar en concordancia con las leyes y normas establecidas a nivel nacional e internacional; en cuanto a la presente investigación se busca cumplir con los aspectos de planificación del mantenimiento que se establecen en las diferentes normativas existentes.

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela

La Constitución de la República Bolivariana de Venezuela: es la carta magna, creada por la soberanía del pueblo, para establecer una sociedad democrática, participativa y protagónica; que asegure el derecho a la vida, a la independencia al trabajo, a la educación, a la cultura, a la justicia social y a la igualdad sin discriminación alguna.

Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN)

Es la encargada de velar por la estandarización y normalización bajo lineamientos de calidad en Venezuela estableciendo los requisitos mínimos para la elaboración de procedimientos, materiales, productos, actividades y demás aspectos que estas normas rigen.

- COVENIN 3049:1993 “Mantenimiento. Definiciones”

International Organization for Standardization (ISO)

Es el organismo encargado de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación (tanto de productos como de servicios), comercio y comunicación para todas las ramas industriales a excepción de la eléctrica y la electrónica. Su función principal es la de buscar la estandarización de normas de productos y seguridad para las empresas u organizaciones (públicas o privadas) a nivel internacional.

- ISO 14224:2006 *“Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries — Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment”*

Society of Automotive Engineers (SAE)

SAE es una asociación profesional a nivel mundial activa y organización de normas para los profesionales de la ingeniería en diversas industrias. El énfasis principal es para las industrias de transporte, como vehículos automotores, aeroespaciales y comerciales. La Sociedad coordina el desarrollo de normas técnicas basadas en las mejores prácticas identificadas y descritas por los comités y grupos de trabajo del SAE.

- SAE JA1011 “*Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*”.
- SAE JA1012 “*A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*”.

Normativa de PDVSA

PDVSA tiene un proceso de Normalización Técnica Corporativa (NOR) el cual consiste en la elaboración, revisión, publicación y distribución de normas, mejores prácticas, procedimientos y guías técnicas dirigidas a la ejecución de proyectos de ingeniería, mantenimiento, procura de materiales / equipos, construcción e inspección de las instalaciones, seguridad industrial, higiene ocupacional y ambiente. Dicho proceso corporativo va dirigido a establecer soluciones técnicas y tecnológicas uniformes a situaciones repetitivas, con el objeto de aumentar la productividad, competitividad y continuidad operacional de la corporación, así como proteger la salud de los trabajadores, las instalaciones y el ambiente.

- MM-01-01-01 “Definiciones de Mantenimiento y Confiabilidad”.
- MM-01-01-03 “Tipos y Niveles de Mantenimiento”.
- MM-01-01-07 “Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (SGCM)”.
- MM-02-01-00 “Contexto Operacional para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento”.
- MM-02-01-01 “Jerarquización de Activos por Análisis de Criticidad”.
- MM-02-02-00 “Análisis de la Función del Activo”.

- MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo”.

Las bases legales señaladas respaldan la ejecución de la presente investigación, en términos de cumplir con los lineamientos y requerimientos que se establecen en las diferentes normativas y generar un Plan de Mantenimiento de acuerdo a las necesidades de la Corporación y de esta manera garantizar la continuidad del proceso productivo.

Glosario de Términos

- **Activo:** Es un elemento tangible o intangible, capitalizable en un ciclo de vida establecido, que cumple una función en un proceso productivo y está sujeto a acciones de mantenimiento.
- **Contexto Operacional:** Las circunstancias bajo las cuales se espera que opere el activo físico o sistema.
- **Cromatografía:** Muestra la proporción de los componentes presentes la mezcla de gas natural, así como su peso molecular.
- **Elemento:** Se refiere a partes, piezas, dispositivos, equipos, software, instalaciones y/o edificaciones que conforman el activo.
- **Equipo Natural de Trabajo (ENT):** Es un equipo multidisciplinario constituido por especialistas o actores de diferentes disciplinas que tienen como objetivo guiar la implementación de estrategias de mantenimiento y confiabilidad, la sincronización de actividades, el establecimiento de planes integrales de acción y la optimización de los costos de producción y mantenimiento en la organización. Entre los actores o especialistas que pueden conformar el ENT se encuentran:

custodios de instalaciones, planificador, programador, ejecutor, ente técnico, entre otros.

- **Falla:** Es el estado en el que un equipo o componente se encuentra no disponible para desarrollar una función específica a un nivel de operación deseado.
- **Falla Funcional:** Un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel desempeñado deseado.
- **Función:** Es la capacidad de un elemento o activo de brindar un determinado servicio según las condiciones de trabajo, respetando su diseño.
- **Horas - Hombre:** Son las horas asociadas con el número de personas multiplicado por la duración de ejecución de una actividad.
- **MCC:** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
- **MMPCND:** Millones de Pies Cúbicos Netos por Día.
- **Norma Técnica:** Es un documento formal que establece uniformidad en los criterios técnicos, métodos, procesos y prácticas. En general, se trata de poner en sintonía o coordinación, las labores técnicas de una organización o grupo de profesionales que efectúan algún intercambio.
- **Plan de Mantenimiento:** Es un documento que establece el qué, cómo y con qué frecuencia se ejecutarán las actividades de mantenimiento. Asimismo, incluye los repuestos y recursos necesarios para llevarlas a cabo.

- **SAP PM:** Es un sistema que proporciona a la Gerencia de Mantenimiento el soporte necesario para la planificación, tratamiento y documentación de los trabajos de mantenimiento
- **Tarea:** Es la secuencia detallada de las acciones que se deben realizar para dar cumplimiento a las actividades de mantenimiento establecidas.
- **Taxonomía:** Es una clasificación sistemática de los activos en grupos genéricos, sobre la base de factores comunes a varios de los ítems dentro de un activo, tales como: ubicación, uso, equipos y la subdivisión del mismo, componentes y listas de materiales.
- **Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF):** Es el tiempo promedio entre una falla y otra, éste incluye el tiempo fuera de servicio.
- **Tiempo Promedio Para Reparar (TPPR):** Es el tiempo promedio necesario para restaurar la capacidad funcional de un equipo que ha entrado en condición de falla.
- **Trabajo:** Son todas las actividades de mantenimiento, operación, construcción, reparación, modificación, inspección, entre otras actividades, que se ejecutan en equipos o instalaciones.

CAPÍTULO IV

DISEÑO METODOLÓGICO

Este capítulo tiene como propósito definir el tipo y diseño de la investigación, las unidades de análisis estudiadas, así como las técnicas, instrumentos y el procedimiento de recolección de datos.

Tipo de Investigación

De acuerdo a los objetivos de la investigación y a la problemática planteada, se define el tipo de investigación correspondiente, la cual es de tipo proyectiva y está definida por Hurtado (2000) como:

La elaboración de una propuesta, un plan, un programa o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, o de una región geográfica, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras, es decir, con base en los resultados de un proceso investigativo. (p.325)

Tal y como lo describe el autor la presente investigación busca generar un Plan de Mantenimiento basado en el enfoque de confiabilidad, específicamente con la metodología MCC; el cual es el resultado de un proceso investigativo que requiere la descripción, el análisis, la comparación, la explicación y la predicción del proceso.

Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es de campo no experimental, lo que se hace en esta investigación es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para después analizarlos; tal como lo señala Arias (2006) “consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variables alguna, es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes” (p.94).

Tomando en cuenta lo explicado anteriormente, el estudio se basa en la obtención de información referente a las Miniplantas Compresoras Jusepín desde el contexto operacional hasta historial de fallas, entre otros; para posteriormente analizar toda la información recolectada y dar cumplimiento a los objetivos de la investigación.

Unidades de Análisis (Población y Muestra)

Población:

Para llevar a cabo el presente estudio y dar solución a la problemática planteada, es necesario establecer la población objetivo del mismo, en este sentido, Balestrini (2006) establece que la población es un “conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos, que presentan características comunes” (p.137).

La población en la presente investigación está formada por todos los equipos pertenecientes a las tres Miniplantas Compresoras Jusepín y al área común correspondientes.

Muestra:

Dentro del mismo marco de ideas, Chávez (2003) define la muestra como “una porción representativa de la población, que permite generalizar sobre ésta, los resultantes de una investigación” (p.164).

De este modo se selecciona de una manera no aleatoria e intencional como muestra a los equipos que presentaron un nivel de criticidad alto para la elaboración del plan de mantenimiento mediante la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Es necesario destacar que esta muestra es seleccionada debido a su alto impacto en el proceso productivo del Distrito, además estos cumplen con las características para aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad por sus condiciones en cuanto a criticidad.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos están referidos a los métodos que se utilizan a lo largo de todo el proceso de investigación, en función del problema y de las interrogantes que pudieron plantearse, así como de los objetivos que han sido definidos. Las técnicas de recolección de datos a utilizar son la observación directa, las entrevistas y la revisión bibliográfica; las cuales se describen a continuación.

Observación Directa

Tamayo y Tamayo (1990) explican que “es en la cual el investigador puede observar y recoger datos mediante su propia observación” (p.98). Esta técnica se utilizará con el fin de obtener la apreciación directa del contexto operacional de las Miniplantas compresoras, identificando los sistemas,

equipos y dispositivos que las componen, así como el reconocimiento de la dirección del flujo recorrido que tiene el proceso de compresión de gas en dichas plantas.

Entrevista

Se utiliza para conocer el tema, objeto de estudio, de forma general, a través de la formulación de una serie de interrogantes al personal relacionado con el trabajo; Tamayo y Tamayo (1990) la definen como “la relación directa establecida entre el investigador y su objeto de estudio a través de individuos o grupos con el fin de obtener testimonios orales” (p.100). De este modo, la aplicación de esta técnica consiste en obtener información del personal que está relacionado con la operación y mantenimiento de las Miniplantas Compresoras para así dar cumplimiento a los objetivos de la investigación durante el proceso correspondiente.

Revisión Bibliográfica

Según el manual de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2005), se define como: “la acción de explorar libros, revistas y documentos que sirven para el desarrollo total o parcial de la investigación” (p.96). Esta técnica se utiliza para la recolección de datos de forma detallada en el Manual de Mantenimiento de la Corporación con el fin de obtener un Plan de Mantenimiento en concordancia con los aspectos y/o lineamientos exigidos en las normas correspondientes, además se recolectan datos provenientes de manuales del fabricante, hojas técnicas, entre otros, que permitan llevar a cabo una correcta identificación de aspectos y/o parámetros referentes a los equipos, partes y/o componentes que debe contemplar el Plan de Mantenimiento.

Procesamiento de la Información

El procesamiento de la información es la manera en que se van a recoger y tabular los datos obtenidos mediante las técnicas de recolección de datos, en este trabajo de investigación la tabulación se hará de forma mecánica con el uso de la computadora, específicamente por medio de los programas *Word* y *Excel* pertenecientes al paquete de *Microsoft Office*.

Análisis de la Información

En la investigación se llevará a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo, cualitativo debido a que durante el proceso de desarrollo del estudio se analizarán diversos factores en cuanto a composición de las Miniplantas y cuantitativo ya que se analizarán parámetros de funcionamiento de las mismas; todo esto para dar como resultado el Plan de Mantenimiento a partir del análisis efectuado.

Procedimiento Metodológico

A continuación se muestra el procedimiento que se llevó a cabo para el logro de los objetivos específicos establecidos en la investigación, es necesario resaltar que este fue adoptado bajo los lineamientos de la Gerencia de Confiabilidad y Mantenimiento de PDVSA.

1. Diagnóstico del contexto operacional de las Miniplantas Compresoras Jusepín.
 - Revisión de manuales del fabricante y de la Corporación, planos, diagramas de proceso.
 - Entrevistas al personal de operaciones de la planta.

- Inspección de los diferentes sistemas que componen a las Miniplantas.
 - Definición de los sistemas y sub-sistemas por la función que cumplen en el proceso.
 - Elaboración de Diagramas Entrada-Proceso-Salida (EPS).
 - Detección de los equipos y/o sub-equipos desincorporados o fuera de servicio.
2. Establecimiento de la taxonomía de las Miniplantas hasta el nivel 7 de acuerdo a la Norma Técnica MM-01-01-07 “Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (SGCM)”.
- Conocimiento de la codificación establecida para la taxonomía de los activos establecida en la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07.
 - Identificación de todos los sistemas, sub-sistemas, equipos y sub-equipos mantenibles de las Miniplantas Compresoras.
 - Asignación de códigos taxonómicos a la planta, sistemas y sub-sistemas.
3. Análisis de criticidad de los sistemas, sub-sistemas y/o equipos de las Miniplantas Compresoras Jusepín.
- Definición del alcance del análisis listando los sistemas y sub-sistemas considerados.
 - Obtención de los valores y/o rangos de las variables en el estudio: Frecuencia de Fallas, Nivel de Producción, TPFs, Impacto en Producción, Costo de Reparación, Impacto en Seguridad, Impacto Ambiental.

- Conversión a puntos equivalentes mediante la Matriz de Puntos de Criticidad de la Gerencia de Confiabilidad.
 - Calculo de la criticidad de los sistemas y sub-sistemas mediante la fórmula: $Criticidad = Frecuencia\ de\ fallas \times \{(Nivel\ de\ Producción \times TPFs \times Impacto\ en\ la\ Producción) / 24 + Costo\ de\ Reparación + Impacto\ en\ Seguridad + Impacto\ Ambiental\}$
 - Ubicación de los resultados en las matrices de criticidad.
 - Validación de los resultados obtenidos mediante una mesa de trabajo con el Equipo Natural de Trabajo.
4. Planteamiento de las tareas de mantenimiento por niveles, mediante la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) a los sistemas principales de alta criticidad, siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03 “Tipos Y Niveles de Mantenimiento”, utilizando plantillas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).
- Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF) de los sistemas, subsistemas y/o equipos mediante la revisión de historiales de los equipos y entrevistas al personal de mantenimiento.
 - ✓ Análisis de las funciones de los equipos.
 - ✓ Identificación de las fallas funcionales que se manifiestan en cada activo estudiado.
 - ✓ Determinación de los modos de falla (causa de la falla) para cada falla funcional.
 - ✓ Identificación de la frecuencia de ocurrencia, el patrón y los efectos (inicial y final) de cada modo de falla.

- ✓ Determinación de la severidad de la falla y el tipo de consecuencia (Oculta, Seguridad, Ambiente, Operacional, No operacional).
- Establecimiento de las tareas de mantenimiento basadas en la factibilidad técnica y que logren mitigar las consecuencias asociadas a los modos de falla.
 - ✓ Proponer las frecuencias de ejecución de las tareas de mantenimiento planteadas y el ejecutor responsable (predictivo, mecánica, general, electricidad, instrumentación, operador).
- 5. Establecimiento de los recursos requeridos (equipos, materiales, herramientas y Horas-Hombre) para la ejecución del Plan de Mantenimiento por cada tarea.
- 6. Creación del Plan de Mantenimiento para las Miniplantas Compresoras Jusepín de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo”.
 - Depuración de las tareas obtenidas en las plantillas del MCC por familia de equipos.
 - Registro de dichas tareas, con las Horas-Hombre necesarias, el ejecutor responsable y el nivel de mantenimiento, en el formato establecido por la empresa para planes de mantenimiento preventivo.
 - Asociación de todos los equipos pertenecientes a las Miniplantas Compresoras Jusepín a los que les aplica cada plantilla del plan.
 - Cuantificación del total de Horas-Hombre por cada plantilla.
 - Validación del Plan de Mantenimiento con el Equipo Natural de Trabajo.

8. Determinación la reducción de Horas-Hombre y mejoras del Plan de Mantenimiento.
 - Identificación de las Horas-Hombre establecidas en el plan de mantenimiento preventivo actual de la planta.
 - Cuantificación de las Horas-Hombres del plan propuesto sin las correspondientes a los operadores (nivel 1 de mantenimiento).
 - Descripción de las mejoras del plan propuesto en cuanto a tareas predictivas, tareas alineadas a los requerimientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03 y la frecuencia del mantenimiento según el contexto operacional.

CAPÍTULO V

DIAGNÓSTICO

En este capítulo se describe el contexto operacional de las Miniplantas Compresoras Jusepín del Distrito Furrrial de PDVSA, su frecuencia de fallas, así como el procedimiento utilizado para el establecimiento de la estructura taxonómica y el análisis de criticidad.

Descripción del Proceso de las Miniplantas Compresoras Jusepín

La descripción del proceso de compresión de gas natural en las Miniplantas Compresoras Jusepín forma parte de la identificación del contexto operacional actual de la planta, este fue levantado mediante la revisión de los Manuales de Operación y Mantenimiento proporcionados por el fabricante una vez instalada la planta en el año 1.991, así como la consulta al personal de la Gerencia de Plantas de Gas y Agua y la Gerencia de Mantenimiento para de esta forma lograr obtener los requerimientos de operación y estándares de desempeño del proceso, sistemas, sub-sistemas y equipos asociados en las condiciones operativas. A continuación se describe el proceso de compresión de acuerdo al contexto operacional actual de la planta.

Las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ) son tres (3) unidades idénticas que constan de dos (2) etapas de compresión (ver figura 5.1); denominadas Miniplanta Compresora Jusepín 3, 4 y 5 (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5); cada unidad tiene una capacidad nominal o de diseño de 50 MMPCND, actualmente las Miniplantas

3 y 5 entregan un flujo aproximado de 40 MMPCND y la Miniplanta 4 uno de 60 MMPCND debido a un rediseño llevado a cabo en sus compresores centrífugos (Abril – 2014).

Cada Miniplanta consta de dos (2) etapas de compresión compuestas principalmente por dos compresores centrífugos acoplados a un mismo eje y movidos por un arreglo de motor eléctrico y caja multiplicadora (caja de engranaje), las especificaciones técnicas del arreglo que genera la potencia se muestran en la tabla 5.1.

La descripción del proceso que se presenta a continuación aplica para cada Miniplanta Compresora debido a que estas fueron diseñadas e instaladas de forma idéntica como se explicó anteriormente y la especificación de los equipos que se describen aplica para las tres (3) Miniplantas, los equipos están identificados con un TAG que comienza con la letra “X” lo que significa que dependiendo de a que Miniplanta pertenezca, esta se sustituye por el número de la miniplanta, ya sea 3, 4 ó 5.

El proceso de compresión de las miniplantas comienza desde que el gas de media presión (120 psig), procedente de los módulos de producción, entra al área común de las Miniplantas Compresoras con un flujo de 150 MMPCND y una temperatura de 110 °F.

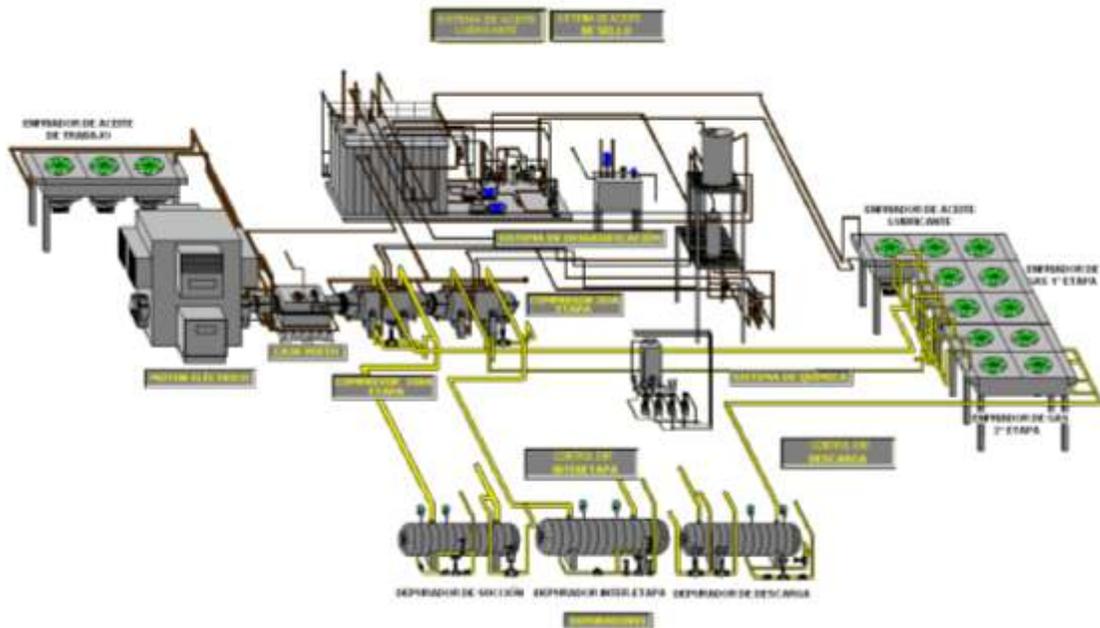


Figura 5.1. Diagrama General de Una Miniplanta Compresora
Fuente: Cabina de Control MPCJ-3

Tabla 5.1. Especificaciones Motor Eléctrico Principal y Caja Multiplicadora

Motor Eléctrico (X0-M-01)		Caja Multiplicadora (X0-K-01)
MPCJ-3	MPCJ-4 y MPCJ-5	MPCJ
Fabricante: Siemens Modelo: 1TZ1533-5CPO2-Z Potencia: 9.890 kw Velocidad: 1795 RPM Voltaje: 13.800 v Corriente: 476 A Frecuencia: 60 Hz	Fabricante: Ansaldo Industrie S.p.a Modelo: W 900 W 4 Potencia: 8.600 kw Velocidad: 1794.5 RPM Voltaje: 13.800 V Corriente: 412.1 A Frecuencia: 60 Hz Factor de potencia: 0.90 Eficiencia: 0.97	Fabricante: VOITH Potencia: 6370 kw Velocidad: 10.440 RPM

Fuente: Elaboración Propia

La corriente de gas pasa primero por el Depurador General de Succión (10-V-01) perteneciente al área común donde se realiza la primera separación del líquido del gas arrastrado desde los separadores de crudo-gas, este depurador posee las especificaciones descritas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Especificaciones del Depurador General de Succión

Depurador General de Succión (10-V-01)	Fabricante: Nuovo Pignone Presión de Diseño: 188.53 psig Temperatura de Diseño: 94,4176 °F Presión Máxima de Trabajo: 193,05 psig a 170 °F
---	---

Fuente: Elaboración Propia

Culminado el primer proceso de depuración el gas se distribuye a las tres (3) Miniplantas Compresoras a través de un cabezal de 30" hacia el Depurador de Succión o de I etapa (XO-S-01) que posee cada Miniplanta, el cual tiene las especificaciones descritas en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Especificaciones del Depurador de Succión

Depurador de Succión (XO-S-01)	Fabricante: Nuovo Pignone Presión Máxima: 188,55 psig Temperatura de Diseño: 176 °F
---	--

Fuente: Elaboración Propia

Ya con el gas sin trazas de líquido por el proceso de depuración previo, este entra al compresor centrífugo de primera etapa (XO-K-01) donde la presión es elevada de 120 psig hasta 500 psig, las características de este compresor se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Especificaciones del Compresor de I Etapa

Compresor de Primera Etapa (XO-K-01)	Fabricante: Nuovo Pignone Modelo: BCL-405 RPM Nominales: 10.315 Velocidad: 10.500 RPM Potencia, HP (kw): 3.995 kw Presión Nominal de Descarga: 470 psig Temperatura Nominal de Descarga: 264 °F
---	--

Fuente: Elaboración Propia

Después de que la corriente de gas pasa por la primera etapa de compresión (ver figura 5.2) es dirigido al enfriador de gas de primera etapa (X0-EA-01) equipado con cuatro (4) ventiladores accionados por un motor eléctrico cada uno, en este enfriador la temperatura del gas es bajada de 273 a 110 °F.

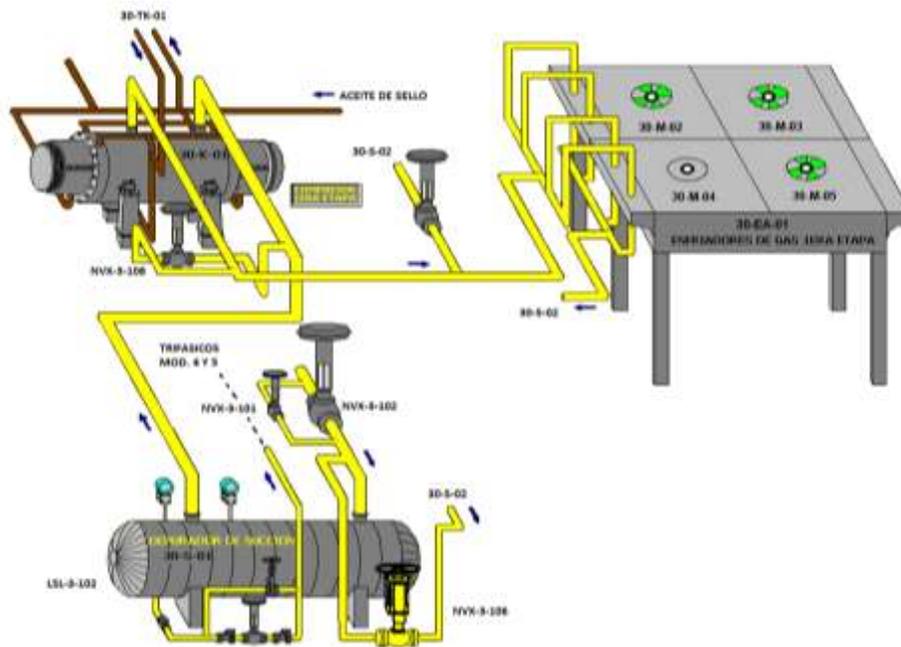


Figura 5.2. Diagrama I Etapa de Compresión

Fuente: Cabina de Control MPCJ-3

El Enfriador de Gas de Primera Etapa posee las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Especificaciones del Enfriador de Gas I Etapa

Enfriador de Gas de Primera Etapa (X0-EA-01)	Fabricante: Nuovo Pignone Tipo: Fin-Fan Presión Máxima: 536,7 psig a 329 °F
---	--

Fuente: Elaboración Propia

Desde la salida del enfriador de gas de primera etapa, el flujo de gas se dirige al Depurador Inter-Etapa (X0-S-02) para separar el líquido condensado que se forma por el enfriamiento del gas comprimido. El Depurador Inter-Etapa tiene las características descritas en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Especificaciones del Depurador Inter-Etapa

Depurador Inter-Etapa (X0-S-02)	Marca: Nuevo Pignone Presión Máxima: 536,5 psig Temperatura de Diseño: 176 °F Presión máxima: 560,8 psig a 176 °F
--	--

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que el gas es dejado nuevamente sin trazas de líquido es transferido al Compresor Centrífugo de Segunda Etapa para elevar la presión de 500 psig hasta 1300 psig, las especificaciones de este compresor se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Especificaciones del Compresor Centrífugo II Etapa

Compresor de Segunda Etapa (X0-X-02)	Marca: Nuevo Pignone Modelo: BCL-307A. RPM Nominales: 10.315 RPM: 10.500 Potencia, HP (kw): 2.670 kw Presión Nominal de Descarga: 1232 psig Temperatura Nominal de Descarga: 255 °F
---	--

Fuente: Elaboración Propia

El gas abandona la segunda etapa de compresión (ver figura 5.3) con 1300 psig y 270°F, para dirigirse al enfriador de segunda etapa (X0-EA-02) equipado con cuatro (4) ventiladores accionados por un motor eléctrico cada uno, donde la temperatura se disminuye hasta 110 °F.

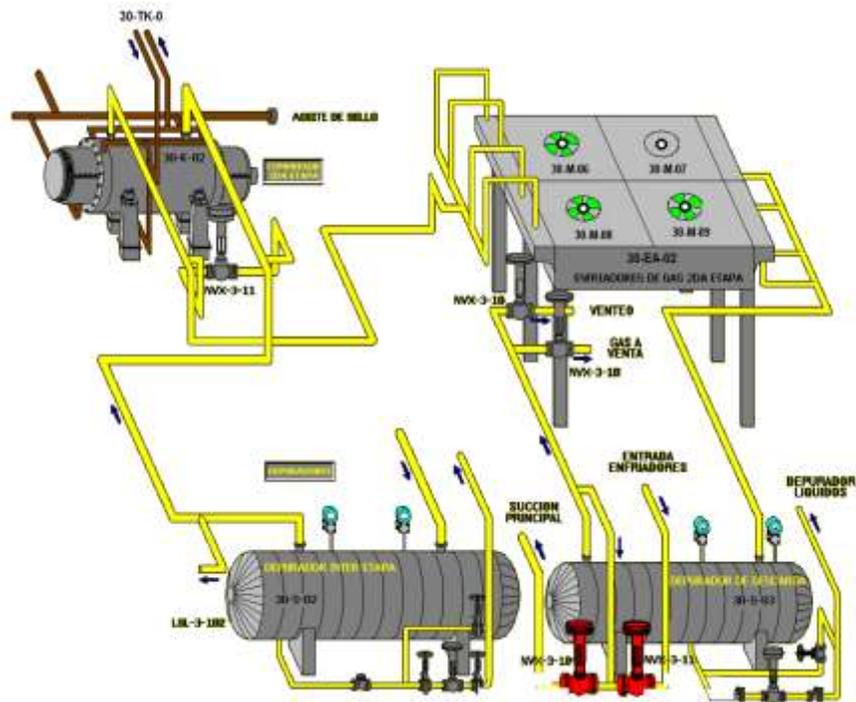


Figura 5.3. Diagrama de la II Etapa de Compresión

Fuente: Cabina de Control MPCJ-3

Las especificaciones del Enfriador de Gas de Segunda Etapa se muestran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Especificaciones del Enfriador de Gas II Etapa

Enfriador de Gas de Segunda Etapa (X0-EA-02)	Fabricante: Nuovo Pignone Tipo: Fin-Fan Presión Máxima: 1.726 psig a 349 °F
---	--

Fuente: Elaboración Propia

Por último, el gas a una presión de 1300 psig es enviado al Depurador de Descarga (X0-S-03) con el fin de separar el líquido formado por el enfriamiento del gas, el Depurador de Descarga tiene las especificaciones que se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Especificaciones del Depurador de Descarga

Depurador de Descarga (X0-S-03)	Marca: Nuevo Pignone Presión Máxima: 1725,95 psig Temperatura de Diseño: 176 °F
--	--

Fuente: Elaboración Propia

El gas comprimido por las tres (3) Miniplantas Compresoras es recogido por un colector y descargado a 1300 psig y hacia el sistema de distribución de gas.

Dentro del proceso de compresión del gas explicado anteriormente se genera líquido condensado que se quedan en los depuradores; el líquido separado en el depurador de descarga es recirculado al depurador inter-etapa y el líquido separado en el depurador inter-etapa es recirculado al depurador general de succión, mientras los líquidos de este último y de la primera etapa son enviados a los separadores trifásicos ST-4 y ST-5.

En el Anexo 2 mediante un esquema se observa todo el proceso de compresión del gas natural llevado a cabo por las Miniplantas Compresoras Jusepín desde que este entra al Depurador General de Succión (10-V-01) hasta que es descargado a una presión de 1300 psig.

Capacidad de Diseño Vs Capacidad Actual

En la tabla 5.10 se muestra la capacidad de diseño y actual para cada Miniplanta Compresora, la capacidad de diseño fue tomada del Manual de Operaciones proporcionados por el fabricante Nuovo Pignone (1.991) y la capacidad actual de los registros diarios que lleva el personal de la Gerencia de Plantas de Gas y Agua.

Tabla 5.10. Capacidad de Diseño vs Capacidad Actual de las MPCJ

Planta	Sistema	Capacidad de Diseño (MMPCND)	Capacidad Actual (MMPCND)
MPCJ	MPCJ-3	50	40
	MPCJ-4	60	60
	MPCJ-5	50	40
TOTAL		160	140

Fuente: Elaboración Propia

Las MPCJ desde su instalación en el año 1.991 tienen una capacidad de diseño total de 150 MMPCND, 50 MMPCND por cada Miniplanta, actualmente la MPCJ-4 fue rediseñada para manejar un total de 60 MMPCND, sin embargo, las MPCJ-3 y MPCJ-5 están entregando un flujo menor al de diseño, representando un 20% de desviación por cada una, es decir, están entregando un promedio de 40 MMPCND por miniplanta, afectando la producción de gas del Distrito Furril.

Cromatografía del Gas Natural de Diseño y Actual

En la tabla 5.11 se muestra la cromatografía del gas natural de entrada y salida de las Miniplantas Compresoras, tanto de diseño como el último análisis realizado (Marzo 2013); la cromatografía de diseño fue obtenida de los manuales de operación de la planta y la actual fue proporcionada por la Gerencia de Plantas de Gas y Agua, este análisis fue realizado por la Empresa *Wide Tec Laboratory C.A.*

Al comparar los valores de cromatografía del gas (diseño y actual) se puede notar que la composición química del gas natural succionado por las miniplantas ha variado considerablemente desde su instalación, presentando menor riqueza y un menor peso molecular, esto se debe a que con la disminución de la capacidad operativa de los pozos productores de petróleo se han aplicado métodos de recuperación secundaria, tales como la inyección de agua y gas a alta presión afectando así su composición.

El peso molecular del gas natural es importante en su proceso de compresión debido a que la reducción en este hace que la curva de rendimiento de los compresores centrífugos baje, influyendo en una mayor frecuencia de fallas e impactando de manera negativa la producción; lo cual es, sin duda una de las causas de la disminución considerable en la capacidad de producción que tienen actualmente las miniplantas.

Tabla 5.11. Cromatografía del Gas de Diseño y Actual de MPCJ

CROMATOGRAFÍA DEL GAS NATURAL (DISEÑO)				CROMATOGRAFÍA DEL GAS NATURAL (ACTUAL)			
	Entrada	Salida	Mol %		Entrada	Salida	Mol %
Metano	56,17	60,97		Metano	76,57	76,63	
Etano	12,15	13,03		Etano	10,28	10,22	
Propano	11,29	11,6		Propano	4,37	3,52	
n-butano	5,38	4,59		n-butano	1,698	1,2	
i-Butano	2,34	2,17		i-Butano	0,875	0,7026	
n-Pentano	2,23	0,95		n-Pentano	0,57	0,7126	
i-Pentano	2,37	1,27		i-Pentano	0,5	0,464	
n-Hexano	1,9	0,18		n-Hexano	0,093	0,9836	
n-Heptano	-	-		n-Heptano	0,011	0,9622	
n-Octano	-	-		n-Octano	0,003	0,0075	
n-Nonano	0	0,0011		n-Nonano	0,001	0,0092	
n-Decano	0,26	0,28		n-Decano	0	0,0011	
Nitrógeno	4,48	4,85		Nitrógeno	0,13	0,1882	
CO2	trazas	trazas		CO2	4,876	4,3843	
H2S	1,43	0,11		H2S	0,002	0,0013	
Poder Calorífico	-	-	BTU/ft ³	Poder Calorífico	1086,34	1138,38	BTU/ft ³
Peso Molecular	31,185	27,299	lb/lbmol	Peso Molecular	21,86	22,695	lb/lbmol

Fuente: Elaboración Propia

Parámetros de Operación Actuales

A continuación se presentan las variables de operación actuales de las Miniplantas Compresoras Jusepín con respecto a las de diseño, dichos valores fueron tomados de los registros realizados por el personal de la Gerencia de Plantas de Gas y Agua en el período de tiempo del 07/03/2014

al 21/03/2014, los cuales fueron promediados para obtener los valores que se muestran en la 5.12.

Tabla 5.12. Parámetros de Operación Actuales de las MPCJ

Parámetro	Diseño	MPCJ-3	MPCJ-4	MPCJ-5
Velocidad Angular Motor Eléctrico (RPM)	1.795	1.796	1.799	1.796
Velocidad Angular Caja Multiplicadora (RPM)	10.440	10.531	9.963	10.536
Presión Succión I Etapa (psig)	120	127	128	126
Presión Descarga I Etapa (psig)	500	461	517	471
Temperatura Succión I Etapa (°F)	100	105	111	109
Temperatura Descarga I Etapa (°F)	260	298	306	288
Presión Succión II Etapa (psig)	500	455	511	466
Presión Descarga II Etapa (psig)	1.300	1.266	1.284	1.268
Temperatura Succión II Etapa (°F)	110	107	106	108
Temperatura Descarga II Etapa (°F)	260	272	258	269
Temperatura de Descarga Final (°F)	100	103	111	105

Fuente: Elaboración Propia

Diagramas Entrada-Proceso-Salida

En el presente estudio se desarrollaron Diagramas Entrada-Proceso-Salida (EPS) a partir de toda la información descrita anteriormente, para así poder analizar la función de la planta, sistemas y sub-sistemas principales que la componen, con la elaboración de estos diagramas se identificaron las entradas y salidas de acuerdo a con el contexto operacional actual del proceso.

Los Diagramas EPS elaborados fueron el de la planta completa (Miniplantas Compresoras Jusepín) y los sistemas principales (Sistema de Compresión Centrífugo 3, 4 y 5).

En la figura 5.4 se muestra el Diagrama EPS de las Miniplantas Compresoras Jusepín, describiendo las especificaciones de entrada del gas

natural al Depurador de Succión General, el proceso de compresión de gas con los sistemas involucrados para garantizar que se cumpla la función de la planta y a la salida de la tubería de descarga de 12 pulgadas de la planta el gas natural bajo los requerimientos para su inyección al proceso.



Figura 5.4. Diagrama EPS de Miniplantas Compresoras Jusepín (Planta Completa)
Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de los diagramas EPS de los sistemas de compresión Centrifugo fueron analizados desde la entrada de la corriente de gas en el depurador de succión de cada Miniplanta hasta su salida en el depurador de descarga, describiendo además la función del proceso con los sub-sistemas asociados. Por otra parte, es necesario resaltar que la diferencia de los EPS entre cada Sistema de Compresión Centrifugo es el flujo de gas de entrada y salida a cada uno, los cuales se reflejaron de acuerdo al contexto operacional actual. Estos Diagramas EPS se muestran en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7.

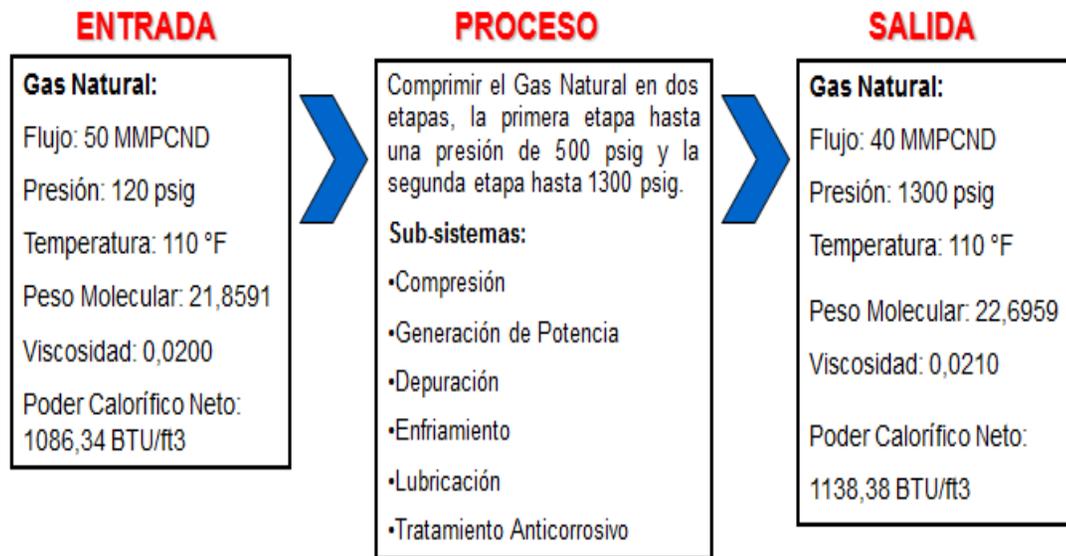


Figura 5.5. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrífugo 3 (MPCJ-3)
Fuente: Elaboración Propia

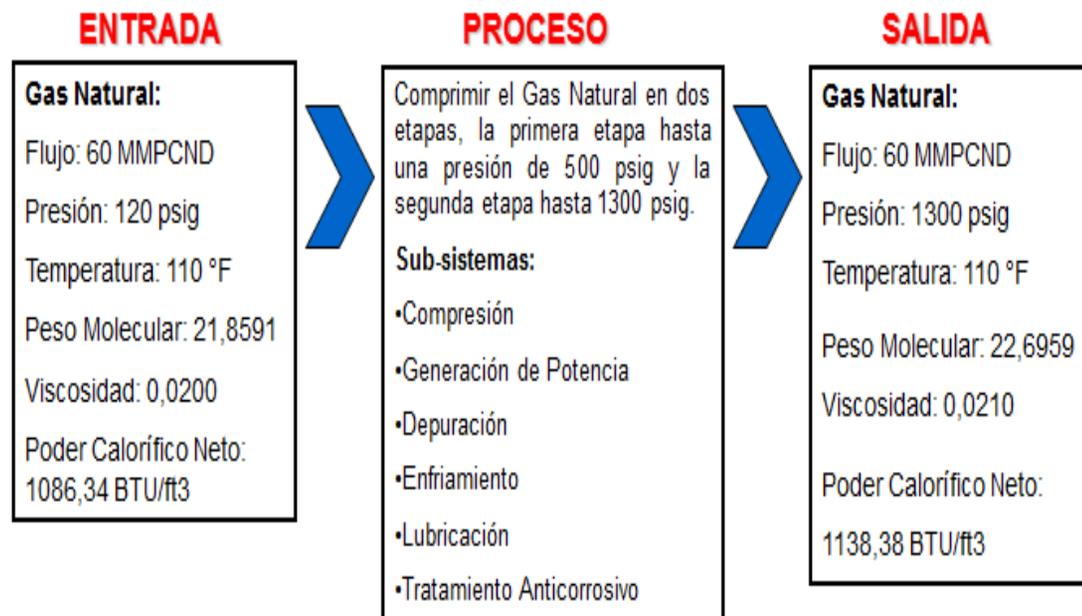


Figura 5.6. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4)
Fuente: Elaboración Propia

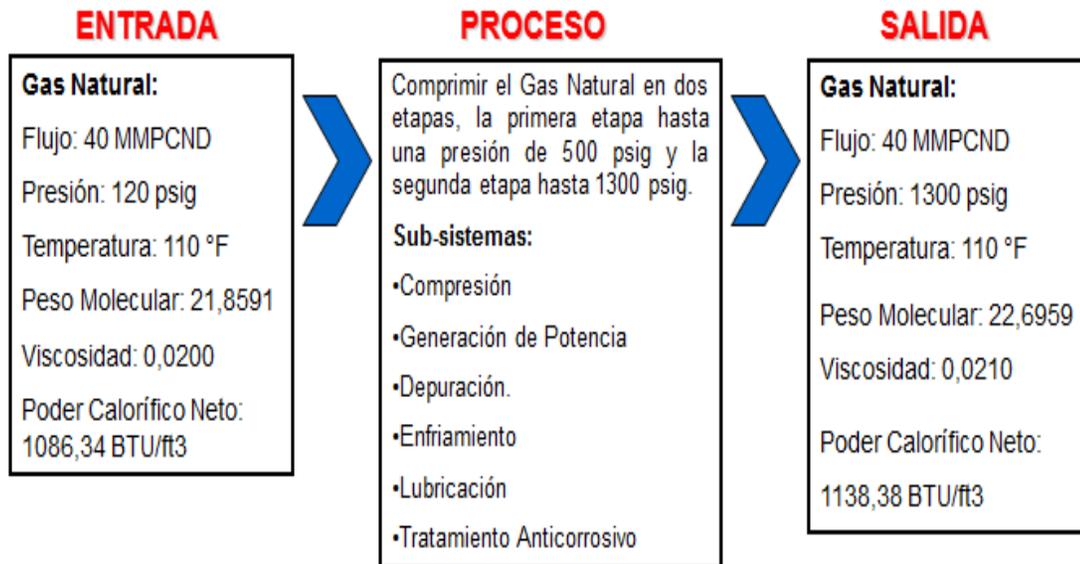


Figura 5.7. Diagrama EPS Sistema de Compresión Centrifugo 5 (MPCJ-5)
Fuente: Elaboración Propia

En el estudio también fueron desarrollados los Diagramas EPS de los Sub-Sistemas: Generación de Potencia, Depuración y Lubricación; los cuales se presentan en el apéndice 1.

Sistemas y Sub-Sistemas

Un sistema es un conjunto ordenado de elementos que están interrelacionados y que interactúan entre sí para lograr un objetivo, los cuales presentan límites o fronteras que marcan todo aquello que está dentro y fuera, de allí que durante el levantamiento del contexto operacional de las Miniplantas Compresoras Jusepín se hizo necesario analizar las funciones de los sistemas que forman parte directa e indirectamente del proceso de compresión del gas natural llevado a cabo en cada miniplanta para el establecimiento de los mismos.

Por consiguiente, los sistemas quedaron definidos por la función que cumplen en el proceso, quedando establecidos de esta forma 10 sistemas que trabajan de forma conjunta para dar cumplimiento al proceso de compresión del gas natural; los cuales son:

- Sistema de Compresión Centrífugo 3 (MPCJ-3).
- Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4).
- Sistema de Compresión Centrífugo 5 (MPCJ-5).
- Sistema de Aire de Instrumentos.
- Sistema de Alivio y Venteo.
- Sistema de Facilidades de Entrada.
- Sistema de Facilidades de Salida.
- Sistema de Detección de Gas y Fuego.
- Sistema Eléctrico de Potencia.
- Sistema de Informática, Comunicación y Control.

Los sistemas denominados como Compresión Centrífugo 3, 4 y 5 representan el proceso de compresión del gas natural de cada Miniplanta Compresora, es decir, el Sistema de Compresión Centrífugo 3 conforma el proceso de compresión de la Miniplanta Compresora Jusepín 3 (MPCJ-3) desde que el gas entra al Depurador de Succión (X0-S-01) hasta que sale del Depurador de Descarga (X0-S-03), aplicando de igual manera para los otros dos sistemas mencionados.

Los siete (7) sistemas restantes sirven de apoyo al proceso de compresión llevado a cabo en cada Miniplanta, están conformados por los equipos que permiten que el gas entre y salga bajo las especificaciones requeridas y exista control del proceso, entre los equipos se encuentran

sistemas de alarma, conjuntos de válvulas, líneas de alimentación eléctrica, la lógica e instrumentos de control que permiten el cumplimiento de la función de las Miniplantas y el control del proceso en tiempo real.

La existencia de sub-sistemas depende de la complejidad del contexto operacional de una determinada planta, para el caso de las Miniplantas se definieron sub-sistemas solo para los Sistemas de Compresión Centrifugo (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5) considerando la función que cumplen en el proceso, esto permite visualizar con mayor facilidad como está estructurado el proceso de compresión, los sub-sistemas definidos se presentan a continuación:

- Sub-Sistema de Compresión.
- Sub-Sistema de Generación de Potencia.
- Sub-Sistema de Depuración.
- Sub-Sistema de Enfriamiento.
- Sub-Sistema de Lubricación.
- Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo.

Equipos y Sub-Equipos

Para el levantamiento del contexto operacional actual de las Miniplantas fue necesaria la identificación de todos los equipos y sub-equipos pertenecientes a estas, además de los equipos principales detallados anteriormente. Esto se hizo mediante la revisión de los planos incorporados en los manuales del fabricante (Nuovo Pignone) de la planta y los actualizados por PDVSA “Servicios e Ingeniería” entre el año 2.002 y 2.005.

En la tabla 5.13 se muestra resumen de los equipos principales por cada uno de los sub-sistemas.

Tabla 5.13. Equipos Principales de las Miniplantas Compresoras Jusepín

Sub-Sistema	Equipos
Compresión	6 Compresores Centrífugos
	6 Válvulas Anti-surge
Generación de Potencia	3 Motores Eléctricos
	3 Cajas Multiplicadoras
Depuración	9 Depuradores
Enfriamiento	6 Enfriadores de Gas
	6 Enfriadores de Aceite
Lubricación	5 Tanques de Aceite
	12 Bombas de Tornillo
	12 Filtros
Tratamiento Anticorrosivo	12 Bombas Neumáticas

Fuente: Elaboración Propia

En la identificación de los equipos mediante planos no sólo se listaron los equipos como, bombas, filtros y tanques, sino también todos los instrumentos considerados como mantenibles por la Gerencia de Mantenimiento; debido a que estos se toman en cuenta en la estructura taxonómica a cargar en SAP PM, para de esta manera poder desarrollar y cargar sus planes de mantenimiento, los instrumentos considerados como mantenibles son:

- Transmisores (presión, temperatura, flujo y nivel).
- Interruptores.
- Controladores.
- Elementos primarios de temperatura (RTD, Termocupla).
- Sensores de vibración.

- Sensores Sísmicos.
- Válvulas automáticas.

Luego de la identificación de equipos y sub-equipos mediante la revisión de los planos correspondientes, se procedió a realizar inspecciones con el personal instrumentista de mantenimiento operacional por plantas compresoras para la validación en campo de cada equipo identificado en los planos, es decir, se verificó que estos estuvieran instalados en el proceso. En el Apéndice 2 se puede visualizar el inventario de equipos y sub-equipos de forma detallada.

En las inspecciones realizadas para la validación de los equipos se pudo observar que tanto los planos proporcionados por el fabricante como los actualizados por PDVSA no contemplan del todo el estado actual de las Miniplantas, notándose equipos que han sido desincorporados y/o reemplazados por otros con diferentes características, sin embargo, estos no han sido tratados con el manejo del cambio establecido en la Norma Técnica PDVSA IR-S-06 “Manejo del Cambio”.

En la tabla 5.14 se presentan los equipos desincorporados en las Miniplantas Compresoras Jusepín que fueron detectados en las inspecciones.

Tabla 5.14. Equipos Desincorporados

Sub-Sistema	TAG	Descripción
Tratamiento Anticorrosivo	35-T-01	Tanque de Inhibidor de Corrosión
	45-T-01	Tanque de Inhibidor de Corrosión
	55-T-01	Tanque de Inhibidor de Corrosión

Fuente: Elaboración Propia

Los tanques señalados en la tabla 6.14 del Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo fueron desincorporados debido a que fue contratada una empresa encargada del suministro del inhibidor de corrosión,

y la misma instaló sus propios tanques para cumplir con la función de este sub-sistema, que es la de inyección de inhibidor de corrosión en las tuberías para prevenir el ataque de corrosión de la presencia combinada de H₂S, CO₂ y agua en el gas natural.

En el Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo también se pudo observar que hubo un cambio en las bombas con respecto a lo establecido en el plano, debido a que estas eran cuatro (4) bombas activadas por un motor eléctrico cada una y fueron sustituidas por bombas neumáticas, sin embargo, esto no se encuentra reflejado en ningún plano de las miniplantas, es decir, no quedó documentado el Manejo del Cambio establecido en la Norma Técnica PDVSA IR-S-06.

Por otra parte, también se encontraron equipos y sub-equipos fuera de servicio, pertenecientes al Sistema de Aire de Instrumentos (ver tabla 5.15), esto debido a que los cuatro (4) compresores recíprocos que se tenían para dicho sistema cumplieron su tiempo de vida útil (declarados en obsolescencia), razón por la cual fueron desincorporados; esto conllevó a que el aire comprimido necesario para los instrumentos este siendo enviado a las Miniplantas desde el Módulo de Producción IV, sin embargo, este Sistema de Aire de Instrumentos está en proceso de ser puesto en servicio nuevamente con el objetivo principal de disminuir la frecuencia de fallas que se han venido presentando por causa de esta condición.

Tabla 5.15. Equipos y Sub-Equipos Fuera de Servicio

Sistema	TAG	Descripción
Aire de Instrumentos	13-K-01	Compresor
	13-V-01	Depurador
	PDSH-2-201	Interruptor de Alta y Baja Presión Diferencial
	PSV-2-201	Válvula de Seguridad
	LCV-2-202	Válvula Controladora de Flujo
	13-F-02	Filtro
	13-D-01/A/B	Secador
	PSV-2-211	Válvula de Seguridad
	PSV-2-212	Válvula de Seguridad
	13-F-03	Filtro
	13-V-02	Depurador

Fuente: Elaboración Propia

A partir de la información recolectada en cuanto a sistemas, sub-sistemas, equipos y sub-equipos, en el Capítulo VI se estableció la taxonomía de las Miniplantas Compresoras Jusepín del Distrito Furrial basada en los requerimientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07 “Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (SGCM)”,

Histórico de Fallas de las MPCJ

El Histórico de Fallas permite evaluar el comportamiento operacional de los activos (instalaciones, sistemas, sub-sistemas y equipos), es por esto que para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de investigación se hace necesario su estudio, debido a que son útiles para la jerarquización de activos por índice de criticidad (Análisis de Criticidad).

Los datos fueron tomados del programa Centinela AICO específicamente los correspondientes a las Miniplantas Compresoras

Jusepín en el periodo de tiempo de Enero del año 2.013 a Mayo del presente año (2.014) y debidamente organizados para obtener las fallas, frecuencias y el Tiempo Fuera de Servicio (TFS).

A partir de la Frecuencia de Fallas y el TFS fue calculado el Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS) para una determinada falla y para cada Miniplanta Compresora utilizando la siguiente fórmula:

$$TPFS = \frac{\sum_{i=1}^n TFS_i}{n} = \frac{\text{Tiempos Fuera de Servicio}}{\text{Número de Fallas}}$$

En el apéndice 3 se puede observar todo el histórico de fallas para las tres Miniplantas por cada mes, con los TPFS calculados, sin embargo, En la tabla 5.16 se presentan un resumen por cada.

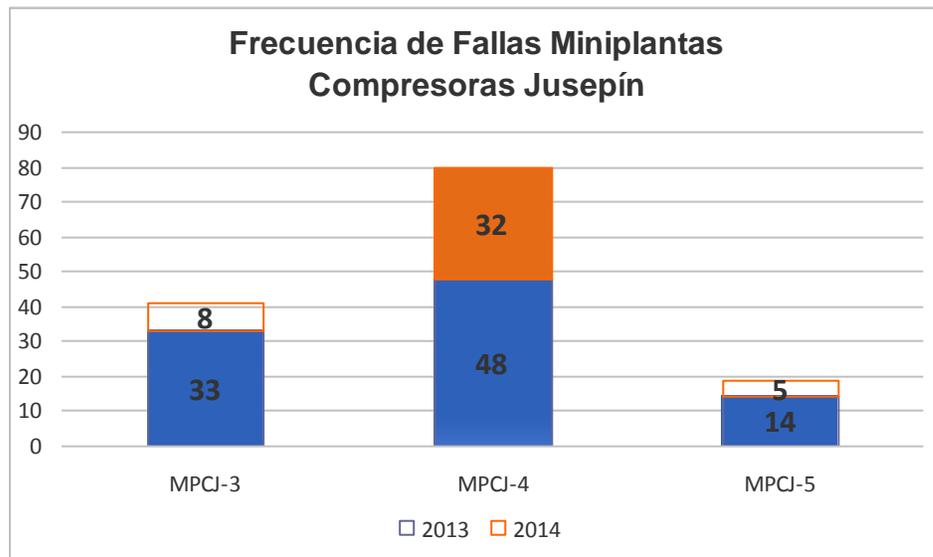
Tabla 5.16. Frecuencia de Fallas y TFS por cada Miniplanta

Sistema	Año	Frecuencia de Fallas	TFS
MPCJ-3	2013	33	49,06
	2014	8	18,09
MPCJ-4	2013	48	46,51
	2014	32	137,47
MPCJ-5	2013	14	70,4
	2014	5	8,08

Fuente: Elaboración Propia

La tabla mostrada anteriormente indica la condición de las Miniplantas Compresoras desde hace un año y medio (Enero 2.013), en la cual se evidencia que estas tienen una alta frecuencia de fallas y por ende un alto Tiempo Fuera de Servicio como consecuencia de las mismas, afectando negativamente los niveles requeridos por la Corporación de compresión de gas natural.

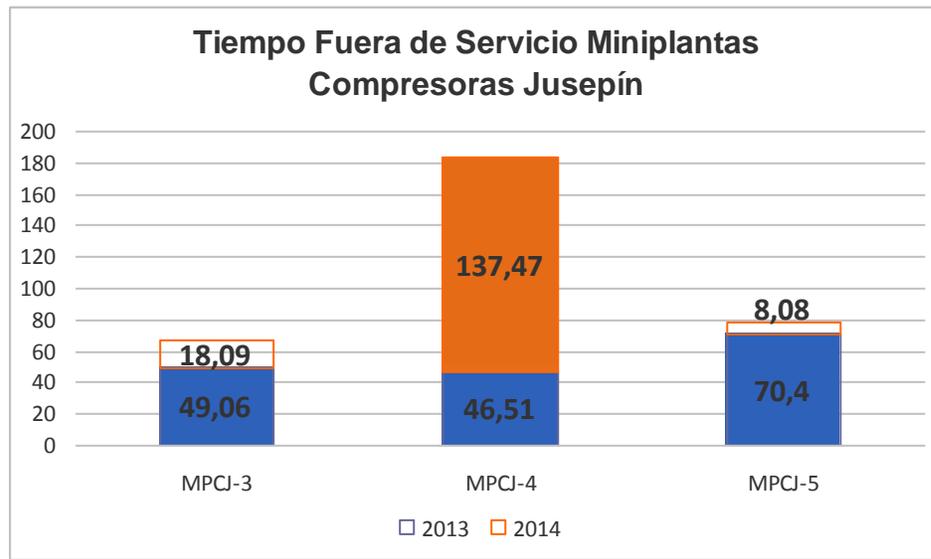
En la gráfica 5.1 se pueden observar el total de fallas por cada Sistema de Compresión Centrífugo, donde se puede apreciar claramente que el Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4) es el que presentó el mayor de número de fallas, asociadas en la mayoría de los casos a sus compresores, motivo principal por lo que el personal de Mantenimiento llevó a cabo el rediseño en estos equipos, como se mencionó anteriormente.



Gráfica 5.1. Frecuencia de Fallas Miniplantas Compresoras Jusepín

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se muestran gráficamente los Tiempos Fuera de Servicio que las Miniplantas tuvieron en el periodo de tiempo estudiado (ver gráfica 5.2), observándose que el sistema que tuvo un mayor TFS en el año 2.013 fue el de Compresión Centrífugo 5 (MPCJ-5), siendo duplicado este tiempo por la MPCJ-4 en los primeros cinco (5) meses del presente año, esto debido principalmente al tiempo de parada de esta Miniplanta en el Mantenimiento Mayor para su rediseño, y una vez puesta en marcha nuevamente, el tiempo de adaptación de esta al proceso (ajustes y/o arreglos finales).



Gráfica 5.2. Tiempo Fuera de Servicio Miniplantas Compresoras Jusepín

Fuente: Elaboración propia

Con la data de Frecuencia de Fallas, Tiempo Fuera de Servicio (TFS) y el Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS) para cada Miniplanta Compresora se realizó un análisis presentado en el capítulo VI del presente trabajo de investigación.

Procedimiento del Análisis de Criticidad

El Análisis de Criticidad se inició con la conformación del Equipo Natural de Trabajo donde participó personal involucrado directamente con la operación (supervisor y operadores de planta), el mantenimiento (supervisores de mantenimiento operacional, personal de Inspección de equipos estáticos y equipos dinámicos), la seguridad, ambiente y confiabilidad operacional; para dar cumplimiento a las diferentes etapas del análisis donde se requirió principalmente del conocimiento técnico de cada ente involucrado.

El Análisis de Criticidad de las Miniplantas Compresoras Jusepín se llevó a cabo bajo lo establecido en la Norma Técnica PDVSA MM-02-01-01 “Jerarquización de Activos por Análisis de Criticidad” con el objetivo principal de identificar los sistemas y sub-sistemas con un nivel alto de criticidad, basado en el contexto operacional actual y de esta manera facilitar la toma de decisiones que aumenten la confiabilidad operacional y disponibilidad del activo, en este caso la primera estrategia adoptada en los sistemas principales críticos fue la elaboración del plan de mantenimiento a partir del análisis del Mantimiento Centrado Confiabilidad (MMC) que se desarrolla más adelante en el presente trabajo de investigación.

Los sistemas y sub-sistemas fueron clasificados en tres (3) niveles de criticidad “A”, “B” o “C”, identificados como; alto, medio y bajo; respectivamente, según la Norma Técnica PDVSA MM-02-01-01.

Para este estudio o análisis se consideraron las variables Frecuencia de Fallas y Tiempo Promedio Fuera de Servicio de cada sistema (sub-sistema y equipo), el nivel de producción, impacto en producción, costos de reparación, impacto en la seguridad del personal e impacto en el ambiente, cuyas variables se relacionan mediante la siguiente ecuación matemática que genera una puntuación para cada sistema evaluado:

$$Criticidad = FF \times \left\{ \left(\frac{Nivel\ Prod \times TPFS \times Imp\ Prod}{24} \right) + Cost\ Rep + Imp\ Seg + Imp\ Amb \right\}$$

Donde:

- **FF:** Frecuencia de Fallas
- **Nivel Prod:** Nivel de Producción
- **TPFS:** Tiempo Promedio Fuera de Servicio
- **Cost Rep:** Costo de Reparación

- **Imp Seg:** Impacto en la Seguridad
- **Imp Amb:** Impacto Ambiental

Es necesario destacar que el presente Análisis de Criticidad se realizó bajo tres (3) escenarios o casos, los cuales son Moderado, Optimista y Pesimista, estos se explican a continuación:

- **Moderado:** También denominado como “Muy Probable” presenta la condición actual de la planta (sistemas, sub-sistemas y equipos); este es el escenario bajo el cual se toman las decisiones en este trabajo de investigación.
- **Optimista:** Muestra como estarían los sistemas y sub-sistemas en caso de que se apliquen las estrategias adecuadas de mantenimiento, operación, seguridad y ambiente para garantizar la integridad, disponibilidad y confiabilidad del activo.
- **Pesimista:** Condición de los sistemas y sub-sistemas en caso de que no se ejecuten dichas estrategias.

El objetivo de realizar una estimación pesimista, una muy probable (moderada) y una optimista, es evaluar los cambios en el nivel de criticidad del activo, dado que los tres (3) escenarios evaluados contribuyen de igual manera a la toma de decisiones por parte de las Gerencias responsables en caso de ser aplicadas acciones, actividades o recomendaciones planteadas que se consideren necesarias para corregir los modos de falla que provocan la falla funcional de los equipos, reducir la frecuencia de ocurrencia de las fallas o eventos de paro, así como, mitigar las consecuencias de los eventos no deseados considerados en el análisis.

Además, esto permite mostrarles al personal de operaciones de la planta (Gerencia de Plantas de Gas y Agua) como se encontraría esta en cuanto a frecuencia de fallas y consecuencias en caso de que no se ejecuten

las acciones de mantenimiento preventivo u otras estrategias que busquen garantizar la continuidad operacional (caso pesimista) y de esta forma generar conciencia para que estos entreguen la planta para los mantenimientos programados; en el caso contrario mostrarles la mejor condición que se tendría si se ejecutan dichas acciones (caso optimista).

No obstante, para el cálculo de la criticidad mediante la fórmula correspondiente para los tres escenarios sólo se variaron los valores en la frecuencia de ocurrencia de fallas y Tiempo Promedio Fuera de Servicio según la metodología recomendada por Yañez M. (2.007) “Confiabilidad Integral”.

Sistemas, Sub-Sistemas y Equipos Considerados en el Análisis de Criticidad.

Como primera condición en el análisis de criticidad se estableció en conjunto con el Equipo Natural de Trabajo que el Sistema de Aire de Instrumentos no se tomaría en cuenta para los cálculos de criticidad por estar desincorporado por más de un año, presentando por consiguiente, altos tiempos fuera de servicio, motivo suficiente para ser considerado de antemano como un sistema crítico (Nivel de Criticidad “A”).

Para determinar el nivel de criticidad de los sistemas y sub-sistemas de las Miniplantas Compresoras Jusepín se consideraron los equipos que se muestran en la tabla 5.17 por cada sistema y/o sub-sistema.

Tabla 5.17. Equipos Considerados en el Análisis de Criticidad

Sistema	Sub-Sistema	Equipo	
		TAG	Descripción
Facilidades de Entrada	-	10-V-01	Depurador General de Succión
		FV-1-107	Válvula Reguladora de Flujo
		NVX-1-102	Válvula Principal de Bloqueo
		NVX-1-101	Válvula de Presurización
		NVX-1-103	Válvula de Venteo de Baja
Facilidades de Salida	-	NVX-1-105	Válvula de Descarga
		NVX-1-106	Válvula de Presurización
		NVX-1-103	Válvula de Venteo de Alta
Detección De Gas y Fuego	-	AE-1-10X, BE-1-10X	Detectores de Gas y Fuego Área omún
		AE-3-10X, BE-3-10X	Detectores de Gas y Fuego MPCJ-3
		AE-4-10X, BE-4-10X	Detectores de Gas y Fuego MPCJ-4
		AE-5-10X, BE-5-10X	Detectores de Gas y Fuego MPCJ-5
Alivio y Venteo	-	11-V-01	Despojador de Líquido
		P-11-01	Bomba de Drenaje
		P-11-02	Bomba de Drenaje
Compresión Centrifugo X	Compresión	X0-K-01	Compresor I Etapa
		FV-X-106	Válvula Antisurge I Etapa
		X0-K-01	Compresor II Etapa
		FV-X-109	Válvula Antisurge II Etapa
	Generación de Potencia	X0-M-01	Motor Eléctrico Principal
		X0-OH-01	Caja Multiplicadora
	Depuración	X0-S-01	Depurador de Succión
		X0-S-02	Depurador Inter-Etapa
		X0-S-03	Depurador de Descarga
	Enfriamiento	X0-EA-01	Enfriador de Gas I Etapa
		X0-EA-02	Enfriador de Gas II Etapa
		X6-EA-01	Enfriador de Aceite de Lubricación y Sello
		X8-EA-01	Enfriador de Aceite Trabajo

Fuente: Elaboración Propia

Continuación Tabla 5.17. Equipos Considerados en el Análisis de Criticidad

Sistema	Sub-Sistema	Equipo	
		TAG	Descripción
Compresión Centrifugo X	Lubricación	X6-T-01	Tanque de Aceite Principal
		X6-P-01A	Bomba Principal de Aceite de Lubricación
		X6-P-01B	Bomba Auxiliar de Aceite de Lubricación
		X6-F-01A	Filtro Principal de Aceite de Lubricación
		X6-F-01B	Filtro Auxiliar de Aceite de Lubricación
		X6-T-02	Tanque Elevado de Aceite de Lubricación
		X7-V-01	Tanque Elevado de Aceite de Sello
		X7-V-02	Tanque Elevado de Aceite de Sello
		X7-P-01A	Bomba Principal de Aceite de Sello
		X7-P-01B	Bomba Auxiliar de Aceite de Sello
		X7-F-01A	Filtro Principal de Aceite de Sello
		X7-F-01B	Filtro Auxiliar de Aceite de Sello
		X7-T-01	Tanque Desgasificador
	Tratamiento Anticorrosivo	X5-P-01A	Bomba Neumática de Inyección
		X5-P-01B	Bomba Neumática de Inyección
		X5-P-01C	Bomba Neumática de Inyección
		X5-P-01D	Bomba Neumática de Inyección

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presenta el proceso de obtención de valores de las variables correspondientes a la fórmula de criticidad mostrada anteriormente.

Frecuencia de Fallas y Tiempo Promedio Fuera de Servicio.

Para la obtención de estos valores se hizo necesario la clasificación de fallas a partir de las mostradas en el apéndice 3, identificando a que sistema, sub-sistema y equipo correspondían dichas fallas; en la tabla 5.18 se muestra un ejemplo de como quedaron clasificadas para Enero y Febrero del año 2.013. Para observar el detalle de la clasificación realizada para todo el periodo de tiempo estudiado ver el apéndice 4.

Tabla 5.18. Ejemplo de Clasificación de Fallas

ENERO (2013)															
Sub-Sistema de Compresión															
Miniplanta 3				Miniplanta 4				Miniplanta 5							
Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS				
Válvulas Antisurge				Válvulas Antisurge				Válvulas Antisurge							
Falla en la válvula de antisurge I etapa	2	1,75	0,87	Falla en válvula antisurge I Etapa	2	1,32	0,66	Valvula antisurge de I etapa fuera de posición	1	1,75	1,75				
Sub-Sistema de Generación de Potencia															
Miniplanta 3				Miniplanta 4				Miniplanta 5							
Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS				
Caja Multiplicadora				Caja Multiplicadora				Caja Multiplicadora							
				Alta temperatura en cojinete	1	1,16	1,16	Alta temperatura	3	2,91	0,97				
Sub-Sistema de Lubricación															
Miniplanta 3				Miniplanta 4				Miniplanta 5							
Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS				
								Baja presión de aceite lubricante	1	7,33	7,33				
FEBRERO (2013)															
Sub-Sistema de Compresión															
Miniplanta 3				Miniplanta 4				Miniplanta 5							
Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS				
Válvulas Antisurge				Válvulas Antisurge				Válvulas Antisurge							
				Falla en secuencia de válvula antisurge I etapa	5	3,07	0,61								
Sistema de Informática, Comunicación y Control															
Miniplanta 3				Miniplanta 4				Miniplanta 5							
Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS	Falla	Nº Fallas	TFS	TPFS				
								Falla comunicación PLC	1	1,5	1,5				

Fuente: Elaboración Propia

A los equipos que no se les lleva el registro de fallas en Centinela AICO fueron obtenidos mediante entrevistas al personal de mantenimiento operacional, supervisores y operadores de las Miniplantas; esta forma de obtención de información es denominado como “Opinión de Expertos” según Yañez M. (2.007) “Confiabilidad Integral”, en el cual básicamente se generan los valores combinando el conocimiento del personal sobre los equipos en análisis, de acuerdo al comportamiento del activo a lo largo de los años.

Los equipos levantados mediante Opinión de Expertos fueron los pertenecientes a los Sistemas de Facilidades de Entrada, Facilidades de Salida, Detección de Gas y Fuego, Alivio y Venteo; así como también los del Sub-Sistema de Enfriamiento y Lubricación, exceptuando los Tanques Elevados de Sello de las tres Miniplantas, los Tanques Principales de las MPCJ-4 y MPCJ-5 y la Bomba Principal de Aceite de Sello de la MPCJ-5.

Para determinar los valores de frecuencias de fallas y TPFs posibles para los tres escenarios (pesimista, moderado y optimista) se hicieron simulaciones Monte Carlo usando el programa *Crystal Ball*, en donde se estableció que el valor pesimista viene dado por el Percentil 95 (P95), el optimista por el Percentil 5 (P5) y el moderado por la media de los datos, de esta manera se obtuvo una distribución probabilística de la Frecuencia de Fallas y TPFs de los sistemas evaluados. A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para obtener estos valores:

a) Para los Datos Obtenidos Mediante Histórico de Fallas:

1. Se ubicaron los valores de Frecuencia de Fallas y TPFS en un archivo *Excel*, de acuerdo con la clasificación realizada (ver figura 5.8), en este caso se tomaron los valores correspondientes a los compresores centrífugos para todo el periodo de tiempo estudiado (Enero 2.013 a Mayo 2.014).

	Compresión Centrífugo 3			Compresión Centrífugo 4			Compresión Centrífugo 5		
	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS
Enero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Abril		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Mayo		0	0,00		0	0,00		1	44,50
Junio	2013	0	0,00	2013	0	0,00	2013	0	0,00
Julio		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Agosto		3	0,97		0	0,00		0	0,00
Septiembre		0	0,00		2	0,63		0	0,00
Octubre		1	7,33		3	0,67		1	4,25
Noviembre		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Diciembre		0	0,00		0	0,00		1	4,25
Enero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo	2014	0	0,00	2014	5	1,93	2014	0	0,00
Abril		1	0,92		3	0,972		0	0,00
Mayo		0	0,00		5	2,8		1	0,83

Figura 5.8. Frecuencia de Fallas y TPFS de Compresores Centrífugos

Fuente: Elaboración Propia

2. Se determinaron los promedios para cada columna de Frecuencia de Fallas y TPFS.

3. Se definieron los supuestos (*Assumption*) sobre los valores promedios calculados. Para la Frecuencia de Fallas del compresor perteneciente al Sistema de Compresión Centrífugo 3, la distribución que mejor se ajustó a los datos fue la logística (ver figura 5.9).

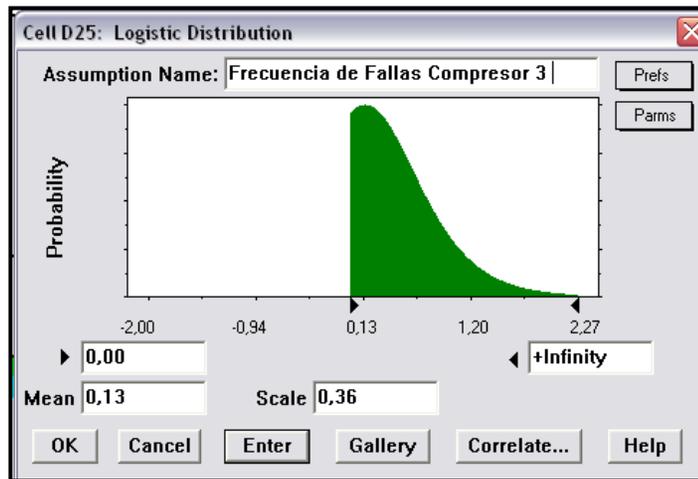


Figura 5.9. Distribución Probabilística Frecuencia de Fallas Compresor 3

Fuente: Programa *Crystal Ball*

4. Una vez definidos los supuestos se procedió a la definición de los pronósticos (*Forecast*) correspondientes. En la figura 5.10 se muestra como ejemplo la definición del pronóstico para el compresor del sistema de compresión centrífugo 3.



Figura 5.10. Definición de Pronósticos del Compresor 3

Fuente: Programa *Crystal Ball*

En la figura 5.11 se pueden observar los supuestos y pronósticos ya definidos, las celdas sombreadas en color verde representan los supuestos y las de color azul los pronósticos generados por *Crystal Ball*.

	Compresión Centrífugo 3			Compresión Centrífugo 4			Compresión Centrífugo 5		
	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS
Enero	2013	0	0,00	2013	0	0,00	2013	0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Abril		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Mayo		0	0,00		0	0,00		1	44,50
Junio		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Julio		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Agosto		3	0,97		0	0,00		0	0,00
Septiembre		0	0,00		2	0,63		0	0,00
Octubre		1	7,33		3	0,67		1	4,25
Noviembre		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Diciembre		0	0,00		0	0,00		1	4,25
Enero	2014	0	0,00	2014	0	0,00	2014	0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo		0	0,00		5	1,93		0	0,00
Abril		1	0,92		3	0,972		0	0,00
Mayo		0	0,00		5	2,8		1	0,83
		0,31	0,58		1,06	0,32		0,24	3,17
		3,72	0,58		12,72	0,32		2,86	3,17

Figura 5.11. Frecuencia de Fallas y TPFS de Compresores
Fuente: Programa *Crystal Ball*

6. Por último se procedió a correr la simulación Monte Carlo, estableciendo un total de 5.000 iteraciones para una mayor confiabilidad en los resultados; luego de terminada la simulación esta arrojó las gráficas correspondientes a los pronósticos donde se puede evidenciar la media. En la figura 5.12, se muestra la gráfica correspondiente a la frecuencia de fallas del compresor del Sistema de Compresión Centrífugo 3, donde la media está dada por 6,59 fallas al año, siendo este el comportamiento actual de este equipo.

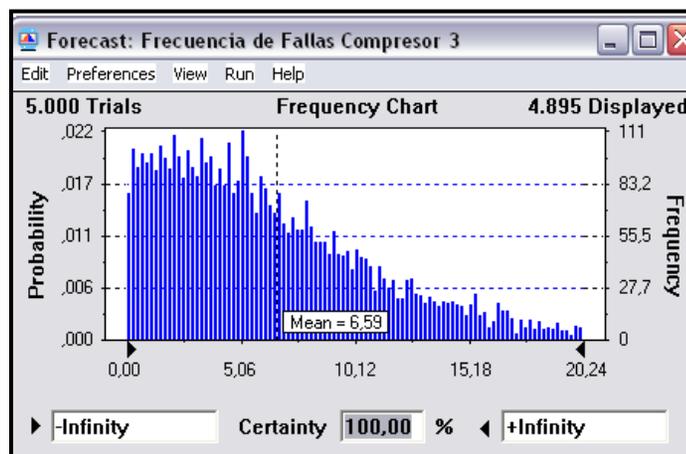


Figura 5.12. Pronóstico de la Frecuencia de Fallas del Compresor 3
Fuente: Programa *Crystal Ball*

Además el programa arrojó los valores de los percentiles P95 y P5, así como la media, en la figura 5.13 se pueden observar dichos valores, notándose que para el compresor centrífugo de la MPCJ-3 la Frecuencia de Fallas es de aproximadamente 6 al año, siendo este la condición actual, en el mejor de los casos (optimista) se obtuvo que esta frecuencia se reduciría a 0,53 fallas al año, es decir, casi nula la probabilidad de que este presente una falla durante un año si se da cumplimiento a las acciones de mantenimiento propuestas; teniéndose además de que en el peor de los casos (pesimista) el compresor tendría aproximadamente 16 fallas al año, siendo este valor alarmante para las gerencias involucradas, obligándolas así a garantizar el mantenimiento preventivo.

	Compresión Centrífugo 3			Compresión Centrífugo 4			Compresión Centrífugo 5		
	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS	Año	Frecuencia de Falla	TPFS
Enero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Abril		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Mayo		0	0,00		0	0,00		1	44,50
Junio	2013	0	0,00	2013	0	0,00	2013	0	0,00
Julio		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Agosto		3	0,97		0	0,00		0	0,00
Septiembre		0	0,00		2	0,63		0	0,00
Octubre		1	7,33		3	0,67		1	4,25
Noviembre		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Diciembre		0	0,00		0	0,00		1	4,25
Enero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Febrero		0	0,00		0	0,00		0	0,00
Marzo	2014	0	0,00	2014	5	1,93	2014	0	0,00
Abril		1	0,92		3	0,972		0	0,00
Mayo		0	0,00		5	2,8		1	0,83
		0,31	0,58		1,08	0,32		0,24	3,17
		3,72	0,58		12,72	0,32		2,88	3,17
P5		0,52	0,08	P5	1,75	0,04	P5	0,47	0,79
P95		16,39	2,84	P95	51,33	1,36	P95	11,89	23,45
MEDIA		6,46	1,11	MEDIA	20,38	0,55	MEDIA	4,89	9,92

Figura 5.13. Percentiles y Media de la Frecuencia de Fallas del Compresor 3

Fuente: Programa *Crystal Ball*

b) Para los Datos Obtenidos Mediante Opinión de Expertos

Estos datos se obtuvieron mediante entrevistas realizadas al personal de mantenimiento operacional, supervisores y operadores de las Miniplantas, a los cuales se les preguntaron acerca de los tres escenarios posibles.

Para las Frecuencias de Fallas se les preguntó acerca de cuantas veces al año normalmente (moderado) han fallado los equipos a los que no se les tenían los registros de fallas, cuantas veces a fallado el equipo en el peor de los casos en un año (pesimista) y el caso contrario el número mínimo de fallas que han presentado (optimista), obteniendo de esta manera los valores correspondientes a los tres escenarios.

En cuanto al TPFS de los equipos se tuvo que realizar una estimación de cual es la falla más común para cada equipo, para de esta manera poder asociar el TPFS correspondiente; de igual manera esto sirvió para las demás consecuencias. En la tabla 5.19 se presenta la estimación de la falla más común por cada equipo.

Tabla 5.19. Falla Común por Equipos

Equipo	Falla Común
Depurador General	Alto nivel de líquido
Válvulas	Válvula fuera de posición
Detectores de Gas y Fuego	Falsa alarma
Despojador de Líquido	Alto nivel de líquido
Bombas de Drenaje	Falla por rodamiento del motor
Enfriadores de Gas	Alta vibración
Enfriadores de Aceite	Alta Vibración
Tanque de Aceite Principal	Bajo nivel de líquido
Bombas de Aceite	Falla por rodamiento del motor y fugas
Filtros de Aceite	Alta presión diferencial
Tanque Desgasificador	Bajo nivel de líquido
Bombas Neumáticas	Fuga de aire

Fuente: Elaboración Propia

En a tabla 5.20 se muestran los valores obtenidos de Frecuencia de Fallas y TPFS mediante opinión de expertos.

Tabla 5.20. Frecuencia de Fallas y TPFs por Opinión de Expertos

Equipo	Frecuencia de Fallas			TPFS (horas)		
	Pesimista	Moderado	Optimista	Pesimista	Moderado	Optimista
Depurador General	2	1	0	12	4	2
Válvulas	6	4	3	6	3	1
Detectores de Fuego	4	3	2	4	2	1
Detectores de Gas	4	3	2	4	2	1
Despojador de Líquido	2	1	0	6	4	2
Bombas de Drenaje	8	4	2	5	3	1,50
Enfriadores de Gas	5	3	2	48	16	8
Enfriadores de Aceite	3	1	0	48	16	8
Tanque de Aceite Principal	4	2	1	6	3	2
Bombas de Aceite	2	1	0	48	16	8
Filtros de Aceite	2	1	0	5	3	2
Tanque Desgasificador	2	1	0	48	16	6
Bombas Neumáticas	4	2	1	48	16	8

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidos los valores correspondientes de Frecuencia de Fallas y TPFs por Opinión Expertos se realizó la simulación Monte Carlo con el programa *Crystall Ball* de igual manera como se realizó con los obtenidos por histórico de fallas, pero en este caso los resultados se eligieron por la Distribución Triangular, la cual es la recomendada para datos obtenidos por Opinión de Expertos (2.007) “Confiabilidad Integral”.

En la figura 5.14 se muestra como ejemplo la gráfica de resultados correspondiente a la frecuencia de fallas del Depurador General de Succión

(10-V-01), donde la media es de 1,27 fallas al año, el cual no representa gran preocupación para el personal de operaciones, debido a que los depuradores son recipientes que generalmente no presentan gran número de fallas.

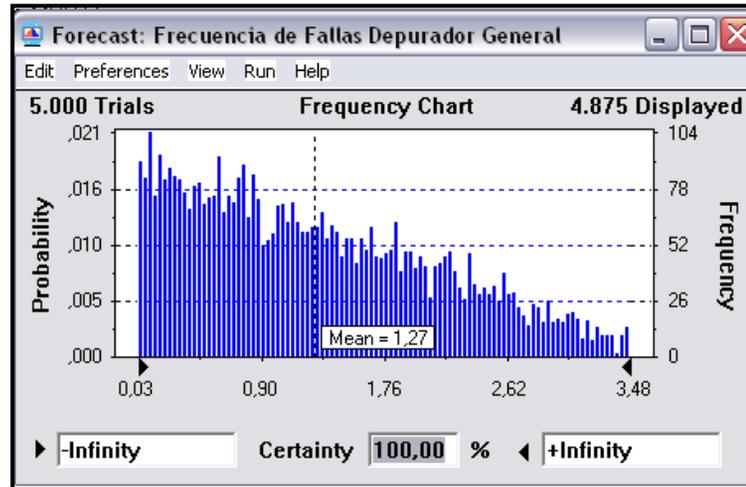


Figura 5.14. Pronóstico de la Frecuencia de Fallas del Depurador de Succión 3
Fuente: Programa *Crystal Ball*

Además el programa arrojó los valores de los percentiles P95 y P5, así como la media, en la figura 5.15 se pueden observar dichos valores, evidenciándose que el número de fallas de este equipo no es alarmante en ninguno de los tres casos (psimista, moderado y optimista), debido a que en el peor de los casos tendría un úmero de máximo de 3 fallas al año.

Depurador General de Succión		
Escenario	FF	TPFS
Pesimista	2	12
Moderado	1	4
Optimista	0	2
	1	6
	1	6
P95	2,93	16,51
P5	0,10	1,36
MEDIA	1,27	7,61

Figura 5.15. Percentiles y Media de Frecuencia Fallas del Depurador de Succión
Fuente: Programa *Crystal Ball*

Con el procedimiento anteriormente explicado para el cálculo de los valores posibles para cada escenario (Pesimista, Moderado y Optimista) de los Compresores Centrífugos y el Depurador General de Succión, se calcularon para todos los equipos, en la tabla 5.21 se presentan los resultados de la Frecuencia de Fallas y TPFS para el tren de compresión de cada Miniplantas (motores eléctricos, cajas multiplicadoras y compresores centrífugos); además en el apéndice 5 se muestran los resultados correspondientes a todos los equipos considerados en el análisis.

Tabla 5.21. Frecuencia de Fallas y TPFS Simulados

Equipo		Frecuencia de Fallas			TPFS		
TAG	Descripción	P95	Media	P5	P95	Media	P5
30-K-01/02	Compresores Centrífugos	16,49	6,53	0,51	2,83	1,12	0,09
30-M-01	Motor Eléctrico Principal	11,01	4,24	0,36	1,01	0,40	0,03
30-OH-01	Caja Multiplicadora	30,39	11,99	0,92	5,18	2,17	0,17
40-K-01/02	Compresores Centrífugos	50,78	20,07	1,85	1,36	0,55	0,04
40-M-01	Motor Eléctrico Principal	4,35	1,67	0,13	0,37	0,15	0,01
40-OH-01	Caja Multiplicadora	31,39	13,61	1,51	16,31	3,62	0,01
50-K-01/02	Compresores Centrífugos	12,33	4,90	0,43	35,75	11,4	3,04
50-M-01	Motor Eléctrico Principal	5,23	2,80	0,95	36,6	11,66	3,04
50-OH-01	Caja Multiplicadora	14,65	5,76	0,48	3,02	1,18	0,09

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se puede observar que de los equipos que conforman el tren de compresión de cada Miniplanta los que presentan una mayor frecuencia de fallas actualmente son los compresores de la MPCJ-4, pudiendo llegar a fallar en el caso pesimista hasta un total 50 veces al año, lo que conllevaría a un incremento de los costos de mantenimiento y evidentemente a la continuidad en la entrega de gas de 60 MMPCND que debe entregar esta Miniplanta o Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4).

Por otra parte, se tiene que en el caso optimista todos los equipos mostrados tendrían un promedio de una falla al año, lo que representa una gran mejoría en comparación a como se encuentran en el caso moderado o actual.

En los resultados del Tiempo Promedio Fuera de Servicio para el caso moderado se obtuvo que los equipos que presentan un mayor tiempo para restituirlos a condiciones óptimas de operatividad una vez que quedan fuera de servicio por una falla son el motor eléctrico y los compresores de la MPCJ-5, con un tiempo de aproximado de 11 horas, pudiendo ser optimizado este tiempo a tres (3) horas implementando las estrategias y/o acciones de mantenimiento acertadas.

Nivel de Producción.

El nivel de producción representa la capacidad de producción diaria de del sistema estudiado en las condiciones de operación existentes; en la Miniplantas Compresoras Jusepín se tienen tres (3) niveles de producción (140, 60 y 40 MMPCND), clasificados de la siguiente forma (ver tabla 5.22):

Tabla 5.22. Niveles de Producción por Sistemas

Sistema	Nivel de Producción (MMPCND)
Facilidades de Entrada	140
Facilidades de Salida	140
Detección de Gas y Fuego	140-60-40*
Alivio y Venteo	140
Eléctrico de Potencia	140
Informática, Comunicación y Control	140
Compresión Centrífugo 3	40
Compresión Centrífugo 4	60
Compresión Centrífugo 5	40

Fuente: Elaboración Propia

Los niveles de producción mostrados en la tabla 5.22 fueron obtenidos mediante el levantamiento del Contexto Operacional de la planta y aplicaron para cada sub-sistema y equipo pertenecientes a cada sistema.

Como puede notarse en el Sistema de Detección de Gas y Fuego se manejan los tres niveles de producción, estos dependieron del área donde se encuentran los detectores, ya sea en el área común (140 MMPCND), la MPCJ-3 (40 MMPCND), MPCJ-4 (60 MMPCND) o la MPCJ-5 (40 MMPCND).

Además los sistemas que manejan el total de la producción de las Miniplantas Compresoras (MPCJ) son el de Alivio y Venteo, Eléctrico de Potencia y el de Informática, Comunicación y Control; debido a que una falla en estos sistemas provoca la parada de la planta completa, afectando toda la producción, que es de 140 MMPCND de gas natural a 1300 psig.

Impacto en Producción.

El impacto en producción consiste en el porcentaje de producción que se ve afectado cuando ocurren fallas en el sistema estudiado, el cual es clasificado en seis (6) rangos, de acuerdo con la matriz de puntos de criticidad proporcionada por el personal de la Gerencia de Confiabilidad:

- No Impacta Producción.
- 0 – 25%
- 26 – 50%
- 51 – 75%
- 76 – 99%
- La impacta totalmente (No hay Stand By).

Para asociar el rango del impacto en producción por tipo de equipo en caso de que estos presenten una falla durante el proceso de compresión del gas natural se realizaron consultas al personal de operaciones de las Miniplantas Compresoras, en la tabla 5.23 se muestra la asociación de estos rangos, donde se puede observar que los equipos que impactan la producción totalmente de gas natural en caso de que presenten una determinada falla durante el proceso de compresión son los depuradores, válvulas, detectores de gas y fuego, compresores, motores principales, cajas multiplicadoras y tanques; siendo las fallas que ocurren en las válvulas, detectores y los tanques las que dan paro para protección de cada Sistema de Compresión Centrífugo, según donde pertenezcan estos.

Tabla 5.23. Impacto en Producción por Equipos

Equipos	Impacto en Producción
Depuradores	La impacta totalmente
Válvulas Reguladoras de Flujo, Bloqueo, Presurización y Descarga	La impacta totalmente
Válvulas de Venteo	0 – 25%
Detectores de Gas y Fuego	La impacta totalmente
Depojador de líquido	No Impacta Producción
Bombas de Drenaje	No Impacta Producción
Compresores Centrífugos	La impacta totalmente
Válvulas Anti-Surge	La impacta totalmente
Motores Eléctricos Principales	La impacta totalmente
Cajas Multiplicadoras	La impacta totalmente
Enfriadores	0 – 25%
Tanques	La impacta totalmente
Bombas de Aceite	No Impacta Producción
Filtros de Aceite	No Impacta Producción
Bombas Neumáticas	No Impacta Producción

Fuente: Elaboración Propia

Costos de Reparación.

El costo de reparación considera el costo promedio para reparar las fallas de un determinado equipo y así restituir su función, incluye todos los costos que se incurren para corregirlas; como labor, materiales y repuestos; en este estudio se tuvieron cinco (5) rangos de costos en Millones de Doláres (MM\$), tomados de la matriz de puntos de criticidad:

- Entre 0 y 10.000
- Entre 11.000 y 20.000
- Entre 21.000 y 50.000
- Entre 51.000 y 100.000
- Más de 100.000

Para la asignación de los costos de reparación a los equipos se realizaron consultas al Departamento de Planificación de la Gerencia de Mantenimiento, donde se asoció un promedio de los costos para cada tipo de equipo al presentar una falla, la asignación de los rangos se muestra en la tabla 5.24, observándose que los equipos que más generan costos para la restitución de su operatividad son los compresores, motores principales y las cajas multiplicadoras, con un valor de más de 100.000 MM\$ por cada falla.

Tabla 5.24. Costos de Reparación por Equipos

Equipos	Costos de Reparación (MM\$)
Depuradores	Entre 51.000 y 100.000
Válvulas	Entre 11.000 y 20.000
Detectores de Gas y Fuego	Entre 11.000 y 20.000
Despojador de Líquido	Entre 51.000 y 100.000
Compresores Centrífugos	Más de 100.000
Válvulas Anti-Surge	Entre 21.000 y 50.000
Motor Eléctrico Principal	Más de 100.000
Caja Multiplicadora	Más de 100.000
Enfriadores	Entre 11.000 y 20.000
Tanques	0 y 10.000
Bombas	0 y 10.000
Filtros	Entre 11.000 y 20.000
Bombas neumáticas	0 y 10.000

Fuente: Elaboración Propia

Impacto en la Seguridad.

El impacto en la seguridad representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen lesiones, heridas o fatalidades del personal en caso de ocurrir una falla; este impacto se asignó a los equipos de acuerdo a los siguientes rangos establecidos en la matriz de punto de criticidad:

- Múltiples fatalidades o gran discapacidad, mayor o igual a 20 MM\$.
- Al menos una (1) fatalidad, discapacidad total o absoluta permanente; entre 15 y 19 MM\$.
- Múltiples lesiones serias, discapacidad temporal o parcial temporal; entre 10 y 14 MM\$.
- Lesión o efecto a la salud serio, hospitalización o discapacidad temporal entre 5 y 9 MM\$.
- Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
- Sin afectación 0 MM\$.

Para la asignación del impacto en la seguridad que podría provocar una falla de un equipo se hicieron consultas al personal de la Gerencia de Seguridad Industrial e Higiene Ocupacional, en la tabla 5.25 se pueden observar los impactos en la seguridad asociados por equipos, donde se obtuvo que el equipo que tiene más probabilidad de causar daños en la seguridad del personal en caso de presentar una falla son las válvulas de salida (descarga y presurización) de toda la planta, debido a que estas manejan una presión del gas de 1300 psig, lo que provocaría lesiones serias al personal en caso de presentar una fuga y/o ignición del gas; por otra parte lo equipos que tienen menos probabilidad de generar daños al personal al fallar (asumiendo que la falla es la común definida en la tabla 5.19) son los

depuradores, detectores de gas y fuego, despojador, enfriadores de aceite, tanques, bombas y filtros.

Tabla 5.25. Impacto en la Seguridad por Equipos

Equipos	Impacto en la Seguridad
Depuradores	Sin afectación 0 MM\$
Válvulas de Entrada	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$
Válvulas de Salida	Lesión o efecto a la salud serio, hospitalización o discapacidad temporal entre 5 y 9 MM\$
Detectores de Gas y Fuego	Sin afectación 0 MM\$
Despojador de Líquido	Sin afectación 0 MM\$
Compresores Centrífugos	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
Válvulas Anti-Surge	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
Motor Eléctrico Principal	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
Caja Multiplicadora	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
Enfriadores de Gas	Primeros auxilios o tratamiento médico puntual, entre 0,1 y 4 MM\$.
Enfriadores de Aceite	Sin afectación 0 MM\$
Tanques	Sin afectación 0 MM\$
Bombas	Sin afectación 0 MM\$
Filtros	Sin afectación 0 MM\$
Bombas neumáticas	Sin afectación 0 MM\$

Fuente: Elaboración Propia

Impacto Ambiental.

El impacto ambiental representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen el incumplimiento de cualquier regulación ambiental, estos niveles de impacto quedaron clasificados de la siguiente forma, de acuerdo a la matriz de puntos de criticidad:

- Grave: Daño ambiental con afectación dentro y fuera de la instalación y Daños a terceros, mayor o igual a 20 MM\$.
- Severo: Derrame masivo o daño a largo plazo, entre 14 y 19 MM\$.
- Moderado: Afectación media fuera de los límites de la instalación, entre 7 y 13 MM\$.
- Bajo: Afectación leve o evento controlable dentro de la instalación, entre 0,1 y 6 MM\$.
- Sin afectación, 0 MM\$.

De igual manera para el establecimiento del nivel de impacto ambiental que puede causar un determinado equipo al presentar una falla se realizaron consultas al personal de la Gerencia de Ambiente, específicamente a los analistas por Plantas Compresoras, en la tabla 5.26 se presenta como quedaron asociados estos impactos por equipos.

Tabla 5.26. Impacto Ambiental por Equipos

Equipos	Impacto Ambiental
Depuradores	Bajo
Válvulas	Bajo
Detectores de Gas y Fuego	Bajo
Despojador de Líquido	Bajo
Compresores Centrífugos	Bajo
Válvulas Anti-Surge	Bajo
Motor Eléctrico Principal	Bajo
Caja Multiplicadora	Bajo
Enfriadores de Gas	Sin afectación, 0 MM\$
Enfriadores de Aceite	Sin afectación, 0 MM\$
Tanques	Bajo
Bombas	Sin afectación, 0 MM\$
Filtros	Sin afectación, 0 MM\$
Bombas neumáticas	Sin afectación, 0 MM\$

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se puede notar que todos los equipos considerados en el análisis de criticidad no tienen afectación al ambiente o esta es muy baja, lo que se considera como un evento controlable dentro de la instalación; en las consultas a los analistas de ambiente de la planta se acordó que estos impactos quedaran definidos así porque las Miniplantas representan un conjunto pequeño en comparación con toda la afectación ambiental que tiene el Distrito Furrial, en cuanto a quema de gas se refiere.

Luego de haber obtenido los valores y/o rangos correspondientes a las Frecuencias de Fallas y sus consecuencias (TPFS, nivel de producción, impacto en producción, costos de reparación, impacto en la seguridad e impacto ambiental) de acuerdo con el contexto operacional de la planta, estos se llevaron a puntos equivalentes para realizar el cálculo de la criticidad por equipos, sub-sistemas y sistemas de las Miniplantas Compresoras Jusepín.

Estos puntos equivalentes se asociaron de acuerdo con la matriz de puntos de criticidad que maneja la Gerencia de Confiabilidad para las Plantas Compresoras de Gas (ver figura 5.16).

}

		DIRECCIÓN EJECUTIVA PRODUCCION ORIENTE	
MATRIZ DE PUNTOS DE CRITICIDAD			
1.- FRECUENCIA DE FALLA (Falla que impacte producción o función del sistema)			Puntaje
Menos de una por año (una cada 2 años)			0,5
Entre 1 y 3 veces/año			2
Entre 4 y 8 veces/año			6
Entre 9 y 20 veces/año			15
Mas de una por día			100
2.- IMPACTO OPERACIONAL ASOCIADO:			
2.1.- NIVEL DE PRODUCCIÓN Normal asociado a la planta/sistema			
GAS NATURAL (MMPCHD)			Puntos/día
0	30		1,4
30,01	60,01		4,7
60,02	90,02		7,6
90,03	120,03		10,4
120,04	152		13,3
2.2.- TIEMPO PROMEDIO FUERA DE SERVICIO (TPFS)			Puntos/día
Menos de 3 hora			2,0
Entre 4 y 24 horas			14
Entre 25 y 48 Horas			73
Entre 43 y 242 Horas			143
Más de 242 días			300
2.3.- IMPACTO EN PRODUCCIÓN (por falla)			Puntaje
No Impacta Producción			0,05
0 - 25 %			0,12
26 - 50 %			0,40
51 - 75 %			0,60
76 - 99 %			0,80
La Impacta Totalmente (No hay stand by)			1
2.4.- COSTO DE REPARACION (totales labor + materiales, repuestos)			Puntaje
Entre 0 y 10.000			1
Entre 11.000 y 20.000			2
Entre 21.000 y 50.000			3
Entre 51.000 y 100.000			8
Mas de 100.000			12
2.5.- IMPACTO EN LA SEGURIDAD PERSONAL (Cualquier tipo de daños, heridas, fatalidad)			Puntaje
Múltiples fatalidades o gran discapacidad, mayor o igual 20 MM\$			200
Al menos 1 (una) fatalidad, discapacidad total o absoluta permanente entre 15 y 19 MM\$			170
Múltiples lesiones serias, discapacidad temporal o parcial temporal entre 10 y 14 MM\$			120
Lesión o efecto a la salud serio, hospitalización o discapacidad temporal entre 5 y 9 MM\$			70
Primeros auxilios o tratamiento médico puntual entre 0,1 y 4 MM\$			20
Sin afectación 0 MM\$			0
2.6.- IMPACTO AMBIENTAL (Daños a terceros, fuera de la instalación)			Puntaje
Grave Daño ambiental con afectación dentro y fuera de la instalación y Daños a tercero mayor o igual a 20 M			200
Severo: Derrame masivo o daño a largo plazo entre 14 y 19 MM\$			170
Moderado: Afectación media fuera de los limites de la instalación entre 7 y 13 MM\$			100
Bajo: Afectación leve o evento controlable dentro de la instalación entre 0,1 y 6 MM\$			30
Sin afectación 0 MM\$			0

Figura 5.16. Matriz de Puntos de Criticidad

Fuente: Gerencia de Confiabilidad

Tanto para el proceso de transformar a puntos equivalentes los datos obtenidos de las variables pertenecientes a la fórmula de criticidad como para el cálculo de las consecuencias y el índice de criticidad por sub-sistemas y sistemas se utilizó una Hoja de Cálculo en *Excel*; en el apéndice 6 se pueden observar detalladamente todos los cálculos realizados.

Para la ubicación de los sub-sistemas en las matrices de criticidad fueron nombrados con un número al final que corresponde al Sistema de Compresión Centrífugo al que pertenecen; ejemplo: el sub-sistema denotado como Compresión 4 pertenece al Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4).

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra el análisis del contexto operacional y la frecuencia de fallas de las Miniplantas Compresoras Jusepín, los resultados del análisis de criticidad, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad y el Plan de Mantenimiento propuesto.

Análisis del Contexto Operacional

Al realizar el levantamiento del contexto operacional de las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ) se pudo observar que dos (2) de las Miniplantas (MPCJ-3 y MPCJ-4) están entregando un flujo menor al de diseño, con una desviación aproximada de 20% cada una, en cuanto a la MPCJ-4 esta si se encuentra manejando el flujo nominal debido a que tuvo un rediseño en Marzo del presente año en sus compresores centrífugos para llegar a una capacidad de producción de 60 MMPCND.

La disminución de la capacidad en la entrega de flujo de gas de las MPCJ está atribuida a la composición del gas, debido a que con la disminución de la capacidad operativa de los pozos productores, se han aplicado métodos de recuperación secundaria, al inyectar agua y gas a alta presión, con lo cual se ve afectado el comportamiento de la composición química del gas, con especial tendencia de disminución de riqueza y peso molecular.

Al variar las condiciones de entrada (temperatura, presión, flujo, composición del gas y peso molecular), el mapa operativo real propuesto por el fabricante deja de tener validez ya que los equipos fueron diseñados de acuerdo a una cromatografía de gas y capacidad que en la actualidad están fuera de especificación, produciéndose incertidumbre en cuanto a las condiciones seguras para operar los compresores.

Estas variables de operación fuera de las condiciones de diseño causan que ocurran auto oscilaciones de la presión y flujo, lo que induce frecuentemente a una reversión del flujo de proceso, por inestabilidad de la masa, fenómeno conocido como “Surge”, lo cual es indeseable ya que puede producir serias averías en los compresores; al no poderse evitar los caudales bajos, ocurre la recirculación del gas en el proceso, las válvulas de recirculación que deberían estar cerradas tienen un porcentaje de apertura, ya que no se completaría el proceso de compresión por las especificaciones de diseño, y por lo tanto el compresor estaría en peligro, aumentando entonces la frecuencia de fallas en las Miniplantas.

Durante el levantamiento del contexto operacional también se pudo observar que en la MPCJ-3 se reemplazó el Motor Eléctrico Ansaldo por un Siemens que maneja una mayor potencia, este fue instalado en el año 2.010, por lo que la Gerencia de Plantas de Gas y Agua en conjunto con la de Mantenimiento tienen como proyecto el reemplazo de los otros dos (2) motores Ansaldo pertenecientes a la MPCJ-4 y MPCJ-5 y con esto suministrar una mayor potencia a los Compresores Centrifugos.

Estructura Taxónomica de las Miniplantas Compresoras Jusepín

La estructura taxonómica es la representación por niveles de los activos de la organización en un arreglo lógico y funcional para el Sistema de Gestión de Control de Mantenimiento (SGCM), es decir, para SAP PM, a través del cual se realizan todos los documentos técnicos y operativos que permiten controlar y asegurar el registro de todas las operaciones de mantenimiento, de allí que su establecimiento esté dentro de los aspectos normativos del Manual de Mantenimiento de PDVSA, por lo que la Gerencia de Confiabilidad Operacional y la Gerencia de Mantenimiento han venido definiendo la taxonomía de diversas plantas del Distrito Furrrial considerando criterios que permitan obtener una estructura taxonómica que cumpla con el análisis de funciones para su establecimiento, tal y como se hizo al levantar el contexto operacional de las Miniplantas en este trabajo de investigación.

Para la definición de la taxonomía de los activos pertenecientes a las Miniplantas Compresoras Jusepín se consideró lo establecido en la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07 “Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión de Control de Mantenimiento (SGCM)”, específicamente la pirámide de los niveles taxonómicos. A continuación se describen los códigos taxonómicos definidos por niveles.

Nivel 1: Negocio.

Considerando que las Miniplantas Compresoras Jusepín pertenecen al Negocio de Exploración y Producción, División Oriente, este nivel queda denominado por los caracteres “PR”, según lo descrito en el Anexo D de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07.

Nivel 2: Categoría del Negocio.

Miniplantas Compresoras Jusepín pertenece al Negocio de Exploración y Producción, División Oriente, Distrito Furrial (Maturín) este nivel queda denominado por los caracteres “MU”, según lo descrito en el Anexo D de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07

Nivel 3: Instalación.

De acuerdo al macroproceso productivo y la localización de Miniplantas Compresoras Jusepín, esta se encuentra en el área del Complejo Jusepín, por lo que este nivel queda denominado por los caracteres “JUS”.

Una vez definidos los niveles de 1 al 4 se da la conformación del primer bloque de caracteres de la codificación de la taxonomía, quedando definido de la siguiente manera:

P	R	M	U	J	U	S
---	---	---	---	---	---	---

Nivel 4: Planta / Unidad.

En este nivel taxonómico se estableció como principal criterio que el conjunto de las tres (3) Miniplantas Compresoras incluyendo el área común representan a una sola planta, al contrario de como se está manejando actualmente en SAP PM donde cada una ellas es una planta, por lo cual este nivel queda designado por los caracteres “MPCJ”; quedando de esta manera conformado el siguiente bloque de la codificación de la taxonomía como se muestra a continuación:

P	R	M	U	J	U	S	-	M	P	C	J	-
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Es necesario resaltar que para la conformación del código de la planta se tiene un bloque con un total de cinco (5) caracteres, en este caso se utilizaron cuatro (4) caracteres y el último a la derecha se rellenó con un guión (-), tal y como lo indica la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07.

Nivel 5: Sección / Sistema.

Los sistemas asociados a la Planta MPCJ están definidos por la función que estos cumplen en el proceso de compresión del gas natural, para un total de 10 sistemas; dentro de los cuales tres (3) son Sistemas de Compresión Centrífugo que representan al proceso de compresión del gas natural de cada miniplanta compresora (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5), tal y como se explicó anteriormente. En la tabla 6.1 se muestra la codificación para todos los sistemas definidos.

Tabla 6.1. Codificación de los Sistemas de MPCJ

Código	Descripción
PRMUJUS-MPCJ-SISTAIRE	Sistema de Aire de Instrumentos
PRMUJUS-MPCJ-SISTALIV	Sistema de Alivio y Venteo
PRMUJUS-MPCJ-SISTENTR	Sistema de Facilidades de Entrada
PRMUJUS-MPCJ-SISTFASA	Sistema de Facilidades de Salida
PRMUJUS-MPCJ-SISTDFYG	Sistema de Detección de Gas y Fuego
PRMUJUS-MPCJ-SISTICCO	Sistema de Informática, Comunicación y Control
PRMUJUS-MPCJ-SISELEC	Sistema Eléctrico de Potencia
PRMUJUS-MPCJ-SISCOCE3	Sistema de Compresión Centrífugo 3 (MPCJ-3)
PRMUJUS-MPCJ-SISCOCE4	Sistema de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4)
PRMUJUS-MPCJ-SISCOCE5	Sistema de Compresión Centrífugo 5 (MPCJ-5)

Fuente: Elaboración Propia

Nivel 5.1: Sub-Sección / Sub-Sistema o Lazo

Los Sub-Sistemas quedaron establecidos para los Sistemas de Compresión Centrífugo, como se explicó en el contexto operacional. En la tablas 6.2, 6.3 y 6.4 se presenta la codificación de los sub-sistemas establecidos en la estructura taxonómica, relacionados con el sistema al que pertenecen.

Tabla 6.2. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-3

Sub-Sistemas de MPCJ-3	
Código	Descripción
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSCOMPR	Sub-Sistema de Compresión
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSGENPO	Sub-Sistema de Generación de Potencia
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSDEPUR	Sub-Sistema de Depuración
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSENFRI	Sub-Sistema de Enfriamiento
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSACEIT	Sub-Sistema de Lubricación
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE3-SSTANTC	Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-4

Sub-Sistemas de MPCJ-4	
Código	Descripción
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSCOMPR	Sub-Sistema de Compresión
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSGENPO	Sub-Sistema de Generación de Potencia
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSDEPUR	Sub-Sistema de Depuración
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSENFRI	Sub-Sistema de Enfriamiento
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSACEIT	Sub-Sistema de Lubricación
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE4-SSTANTC	Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.4. Codificación de los Sub-Sistemas de MPCJ-5

Sub-Sistemas de MPCJ-5	
Código	Descripción
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSCOMPR	Sub-Sistema de Compresión
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSGENPO	Sub-Sistema de Generación de Potencia
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSDEPUR	Sub-Sistema de Depuración
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSENFRI	Sub-Sistema de Enfriamiento
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSACEIT	Sub-Sistema de Lubricación
PRMUJUS-MPCJ--SISCOCE5-SSTANTC	Sub-Sistema de Tratamiento Anticorrosivo

Fuente: Elaboración Propia

Nivel 6: Equipo

Los equipos mostrados en la gráfica 6.1 fueron ubicados en el nivel 6.1 de acuerdo con la pirámide taxonómica de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-07, en la cual quedaron establecidos 19 clasificaciones de equipos, quedando así un total de 298 equipos pertenecientes a las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ), donde 222 corresponden a los tres (3) Sistemas de Compresión Centrífugo (74 para cada uno) y los otros 76 equipos están distribuidos entre los Sistemas de Facilidades de Entrada, Facilidades de Salida, Alivio y Venteo, Detección de Gas y Fuego.



Gráfica 6.1. Activos Clasificados en Nivel 6 de la Estructura Taxonómica

Fuente: Elaboración Propia

Nivel 7: Sub-Equipo.

En el nivel 7 correspondiente a los sub-equipos fueron clasificados los activos mostrados en la gráfica 6.2, quedando un total de 434 sub-equipos distribuidos en 11 clasificaciones, pertenecientes 420 a los tres (3) Sistemas de Compresión Centrifugo (140 para cada uno) y los 14 restantes distribuidos en los Sistemas de Facilidades de Entrada, Facilidades de Salida, Alivio y Venteo.



Gráfica 6.2. Activos Clasificados en Nivel 7 de la Estructura Taxonómica

Fuente: Elaboración Propia

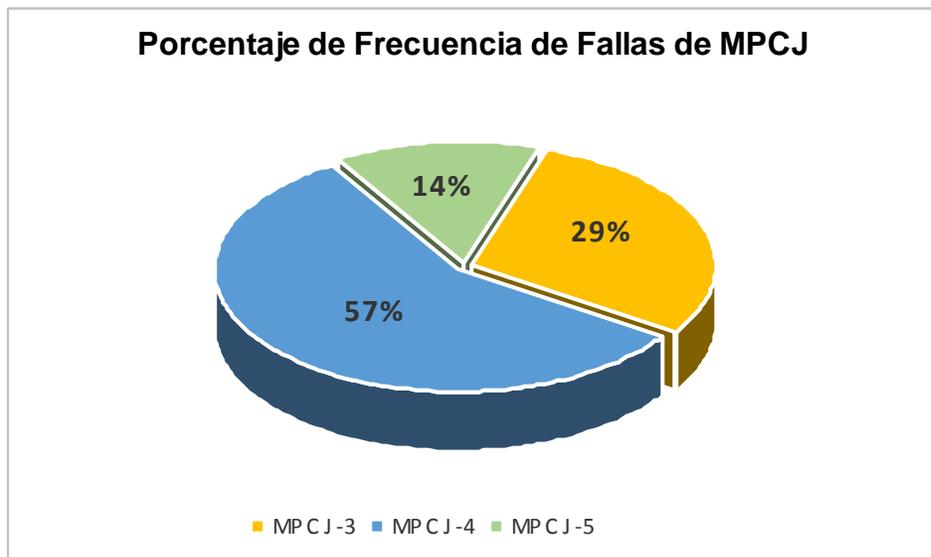
Es necesario resaltar que para los niveles taxonómicos 6 y 7 no se estableció una codificación debido a que los activos clasificados en estos niveles al ser cargados en SAP PM se les genera un código de identificación. Para una revisión más exhaustiva de la estructura taxonómica establecida para las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ) ver el apéndice 2.

Análisis del Histórico de Fallas de las MPCJ

Este análisis se da a partir de la Frecuencia de Fallas y Tiempo Fuera de Servicio de las Miniplantas Compresoras Jusepín para el periodo de tiempo de Enero del 2.013 a Mayo del 2.014 presentados en el Capítulo V del presente trabajo de investigación, considerando además la información recolectada en las visitas realizadas a la planta, entrevistas al personal de operaciones, confiabilidad y mantenimiento.

De acuerdo con el histórico de fallas recolectado en Centinela AICO las Miniplantas tuvieron un total de 140 fallas durante el periodo de estudio, donde la Miniplanta Compresora Jusepín 4 (MPCJ-4) fue la que presentó un mayor número de fallas, con un total de 80, lo que representa el 57% con respecto a las otras dos (2) Miniplantas (ver gráfica 6.3); seguida de la MPCJ-3 con 41 fallas, representado el 29%; por consiguiente la Miniplanta con el menor número de fallas fue la MPCJ-5, con 19 fallas asociadas. Dentro de las fallas más comunes se tienen:

- Válvulas Anti-Surge fuera de Posición.
- Altas vibraciones y alta temperatura en cojietes de los Compresores Centrífugos y Caja Multiplicadora.
- Alto nivel de líquido en Depuradores.
- Bajo nivel de aceite en los tanques.

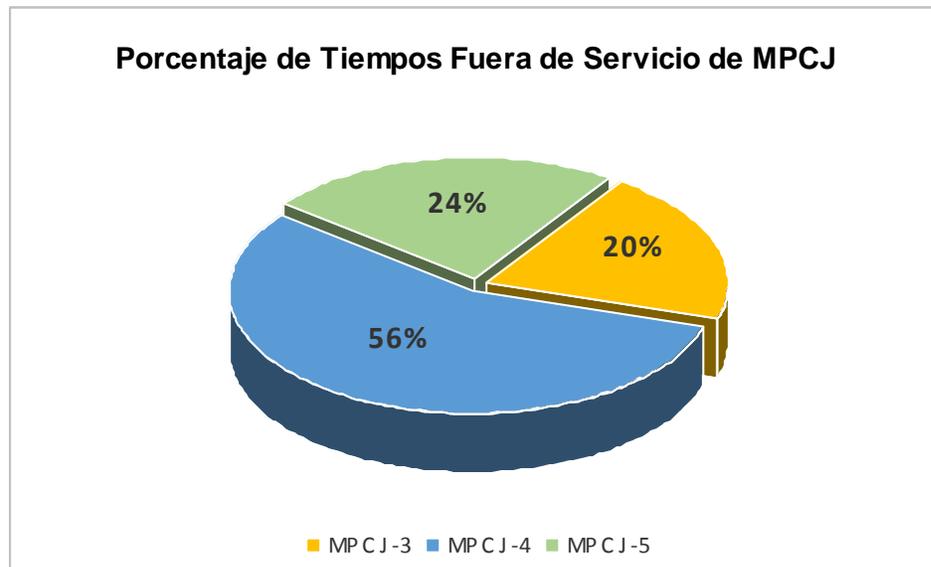


Gráfica 6.3. Porcentaje de Frecuencia de Fallas MPCJ

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a los Tiempos Fuera de Servicio (TFS) se tuvo que la MPCJ-4 presentó un mayor TFS con 183,98 horas (56%), seguido de la MPCJ-5 con 78,48 horas (24%) y la MPCJ-3 con 67,15 horas fuera de servicio (20%), en la gráfica 6.4 se puede observar claramente los porcentajes de distribución de los Tiempos Fuera de Servicio por cada Miniplanta.

A pesar de que la MPCJ-5 tuvo un 15% menos de ocurrencia de fallas con respecto a la MPCJ-3 se pudo observar que esta tuvo un mayor Tiempo Fuera de Servicio, lo cual se debió principalmente a una falla (desplazamiento axial) en el Compresor Centrífugo de Primera Etapa (50-K-01) que conllevó a 44,5 horas fuera de servicio de la Miniplanta.



Gráfica 6.4. Porcentaje de Tiempos Fuera de Servicio MPCJ

Fuente: Elaboración Propia

Resultados del Análisis de Criticidad

A continuación se muestran los resultados de la clasificación por niveles de criticidad de los sistemas y sub-sistemas de la Miniplantas Compresoras Jusepín mediante matrices de criticidad que denotan la intensidad del riesgo, calculados en función de la Frecuencia de Falla (FF) y las consecuencias en el valor del activo.

Los sistemas y sub-sistemas se jerarquizaron en tres (3) niveles de criticidad; alto, medio y bajo; estos se muestran en las matrices para todos los escenarios evaluados (pesimista, moderado y optimista), donde los niveles de criticidad se representan por colores de la siguiente manera:

- **Criticidad Alta “A”:** Color rojo.
- **Criticidad Media “B”:** Color Amarillo.
- **Criticidad Baja “C”:** Color verde.

Los resultados del Análisis de Criticidad realizado a las Miniplantas Compresoras Jusepín se muestran a continuación por sistemas y sub-sistemas para los tres escenarios evaluados.

Criticidad de los Sistemas.

Las matrices de criticidad de los sistemas pertenecientes a las MPCJ se realizaron a partir de la frecuencia de fallas por cada sistema y sus consecuencias, lo cuales fueron calculados en la hoja de Excel mostrada en el apéndice 6. En la tabla 6.5 se muestran los resultados para poder ubicar los sistemas en las matrices de criticidad.

Tabla 6.5. Frecuencia de Fallas Vs Consecuencias de Sistemas

Sistema	Pesimista		Moderado		Optimista	
	FF/Año	Consecuencias	FF/Año	Consecuencias	FF/Año	Consecuencias
Facilidades de Entrada	22,63	367,80	16,31	303,57	3,89	259,13
Facilidades de Salida	22,23	337,48	14,34	320,89	8,79	309,22
Detección de Gas y Fuego	19,64	178,99	4,72	154,02	3,01	136,86
Alivio y Venteo	24,56	101,87	12,39	101,03	3,76	100,43
Eléctrico de Potencia	82,02	62,67	33,65	60,01	3,08	58,18
Informática, Comunicación y control	10,60	38,39	4,20	38,15	0,33	38,01
Compresión Centrífugo 3	199,23	560,21	88,32	370,22	17,66	255,46
Compresión Centrífugo 4	283,18	615,79	121,33	381,77	19,58	259,51
Compresión Centrífugo 5	163,58	603,48	69,58	390,15	13,56	259,01

Fuente: Elaboración Propia

a) Matriz de Criticidad de los Sistemas de las MPCJ para el escenario moderado (ver figura 6.1).

CASO MODERADO							
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta	ELÉCTRICO DE POTENCIA				COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 3 / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 4 / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 5
	15 a 20	Alta				FACILIDADES DE ENTRADA	
	9 a 14	Media		ALIVIO Y VENTEO			FACILIDADES DE SALIDA
	5 a 8	Baja					
	<5	Muy Baja	INFORMÁTICA, COMUNICACIÓN Y CONTROL		DETECCIÓN DE FUEGO Y GAS		
			Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			0-72	73-145	146-218	219-305	>306
Consecuencia de la Falla (MM\$)							

Figura 6.1. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Moderado)

Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior se observa que los tres Sistemas de Compresión Centrífugo (MPCJ3, MPCJ-4 y MPCJ-5) son los más críticos dentro de la planta, seguido por el de Facilidades de Entrada y Facilidades de Salida, siendo estos los que requieren de mayor atención por parte de las gerencias asociadas (Confiabilidad, Plantas de Gas y Agua y la de Mantenimiento), para mejorar su condición y reducir su nivel de criticidad con estrategias y acciones de mantenimiento adecuadas; así mismo se deben enfocar a que el Sistema Eléctrico de Potencia y el de Alivio y Venteo no pasen a la zona de alta criticidad. Más adelante se

analiza de forma más detallada la condición de los sistemas críticos en este caso (moderado) que es el que muestra la situación actual de planta.

b) Matriz de Criticidad de los Sistemas de las MPCJ para el escenario optimista (ver figura 6.2).

CASO OPTIMISTA							
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta					
	15 a 20	Alta				COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 4 / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 3	
	9 a 14	Media				COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 5	
	5 a 8	Baja					FACILIDADES DE SALIDA
	<5	Muy Baja	INFORMÁTICA, COMUNICACIÓN Y CONTROL / ELÉCTRICO DE POTENCIA	ALIVIO Y VENTEO / DETECCIÓN DE FUEGO Y GAS		FACILIDADES DE ENTRADA	
			Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			0-72	73-145	146-218	219-305	>306
Consecuencia de la Falla (MM\$)							

Figura 6.2. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Optimista)

Fuente: Elaboración Propia

En este caso (optimista) se puede apreciar principalmente que el Sistema de Facilidades de entrada bajaría su nivel de criticidad (nivel medio “B”) al ser ejecutadas las acciones de mantenimiento propuestas; sin embargo los Sistemas de Compresión Centrífugo y el de Facilidades de Salida se mantendrían en la misma zona, de alta criticidad, por las

altas consecuencias que tienen los mismos, pero su frecuencia de fallas se vería reducida considerablemente.

c) Matriz de Criticidad de los Sistemas de las MPCJ para el escenario pesimista (ver figura 6.3).

CASO PESIMISTA							
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta	ELÉCTRICO DE POTENCIA	ALIVIO Y VENTEO			FACILIDADES DE ENTRADA / FACILIDADES DE SALIDA / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 4 / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 3 / COMPRESIÓN CENTRÍFUGO 5
	15 a 20	Alta			DETECCIÓN DE FUEGO Y GAS		
	9 a 14	Media	INFORMÁTICA, COMUNICACIÓN Y CONTROL				
	5 a 8	Baja					
	<5	Muy Baja					
			Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			0-72	73-145	146-218	219-305	>306
Consecuencia de la Falla (MM\$)							

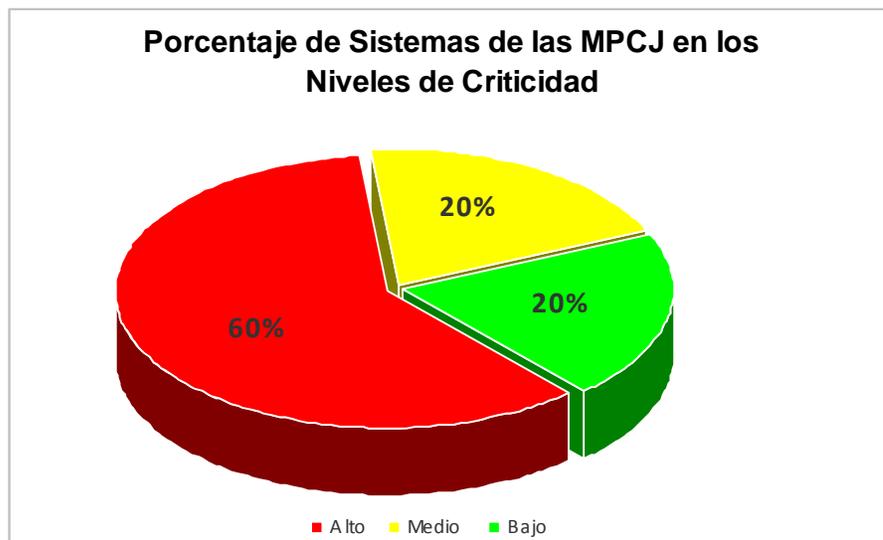
Figura 6.3. Matriz de Criticidad de los Sistemas de MPCJ (Pesimista)

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, en la figura anterior se aprecia que si no se ejecutan las acciones de mantenimiento correctas entraría en el nivel de criticidad alto “A” el Sistema de Detección de Fuego y Gas, afectando negativamente el proceso de compresión de gas, ya que generalmente cada falla presentada

en este sistema da paro a toda la planta; además, todos los sistemas analizados aumentarían su frecuencia de fallas al año.

Como se explicó anteriormente en el presente trabajo de investigación se enfoca principalmente en el escenario moderado para la toma de decisiones y análisis correspondientes, el escenario o caso moderado arrojó que del total de 10 sistemas evaluados se encuentran seis (6) en el nivel de alta criticidad "A", representando el 60% de los sistemas; dos (2) en el nivel de criticidad medio "B" con un 20% y los dos (2) restantes en el nivel bajo "C" con el otro 20%. En la gráfica 6.5 se presenta gráficamente el porcentaje de sistemas que se encuentran en los tres (3) niveles de criticidad (alto, medio y bajo).



Gráfica 6.5. Porcentaje de Sistemas en los Niveles de Criticidad

Fuente: Elaboración Propia

Además, en la tabla 6.6 se muestra un resumen de la jerarquización de los sistemas de las Miniplantas Compresoras para cada uno de los escenarios evaluados, lo que permite visualizar con mayor facilidad los cambios en los niveles de criticidad por cada escenario.

Tabla 6.6. Comparación de Ubicación de Sistemas en los Escenarios Evaluados.

Nivel de Criticidad	Optimista	Moderado	Pesimista
Alto "A"	Facilidades de Salida / Compresión Centrifugo 3 / Compresión Centrifugo 4 / Compresión Centrifugo 5	Facilidades de Entrada / Facilidades de Salida / Compresión Centrifugo 3 / Compresión Centrifugo 4 / Compresión Centrifugo 5	Facilidades de Entrada / Facilidades de Salida / Compresión Centrifugo 3 / Compresión Centrifugo 4 / Compresión Centrifugo 5 / Detección de Gas y Fuego
Medio "B"	Facilidades de Entrada	Eléctrico de Potencia / Alivio y Venteeo / Detección de Gas y Fuego	Eléctrico de Potencia / Alivio y Venteeo
Bajo "C"	Eléctrico de Potencia / Informática, Comunicación y Control / Detección de Gas y Fuego / Alivio y Venteeo	Informática, Comunicación y Control	Informática, Comunicación y Control

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se puede observar que los Sistemas de Compresión Centrifugo 3, 4 y 5 quedaron ubicados en el nivel alto de criticidad para todas los escenarios evaluados; sin embargo, estos sistemas presentarían una variación importante en cuanto a la frecuencia de fallas por cada escenario, es decir, que aunque en el escenario optimista estos sistemas sigan ubicándose en el nivel de criticidad "A" estos tendrían una disminución considerable en el número de fallas que presentarían al año, de igual manera ocurre para el caso pesimista, en el cual se incrementan el número de fallas al año.

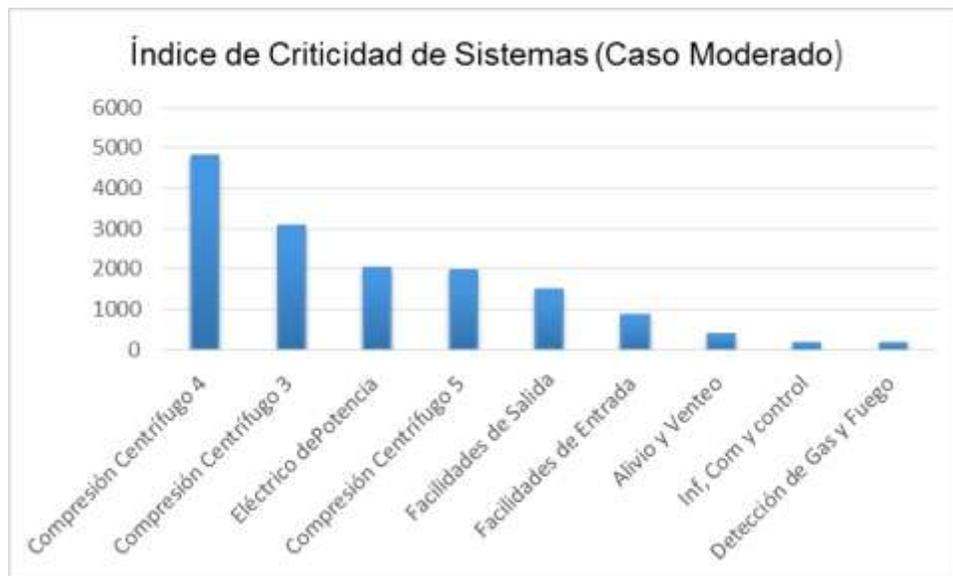
Además de los resultados en la frecuencia de fallas y consecuencias por sistemas también se obtuvo el índice de criticidad (resultado de la multiplicación de la frecuencia de fallas y las consecuencias presentadas en la tabla 6.5.) correspondiente a cada uno; en la tabla 6.7 se muestran el índice de criticidad por sistema para el escenario moderado en orden descendente.

Tabla 6.7. Índice de Criticidad por Sistemas para el Caso Moderado

Sistema	Índice de Criticidad (MM\$)
Compresión Centrífugo 4	4808,78
Compresión Centrífugo 3	3062,64
Eléctrico de Potencia	2019,25
Compresión Centrífugo 5	1949,94
Facilidades de Salida	1486,40
Facilidades de Entrada	865,63
Alivio y Venteo	394,32
Informática, Comunicación y control	160,25
Detección de Gas y Fuego	154,88

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 6.6. se presentan los sistemas según los resultados del índice de criticidad mostrados en la tabla anterior, notándose que el Sistema de Compresión Centrífugo 4 y 3 son los que presentan el mayor índice, además los de menor valor son el Sistema de Informática, Comunicación y Control y el de Detección de Gas y Fuego, lo que quedó evidenciado en la matriz de criticidad moderada.



Gráfica 6.6. Criticidad de Sistemas para el Caso Moderado

Fuente: Elaboración Propia

Criticidad de los Sub-Sistemas.

Las matrices de criticidad de los sub-sistemas fueron realizadas de igual manera a partir de la frecuencia de fallas por cada sub-sistema y las consecuencias asociadas, los cuales fueron calculados en la hoja de cálculo mostrada en el apéndice 6, no obstante, en la tabla 6.8 se presentan los resultados obtenidos por sub-sistemas.

Tabla 6.8. Frecuencia de Fallas Vs Consecuencias de Sub-Sistemas

Sub-Sistema	Pesimista		Moderado		Optimista	
	FF/Año	Consecuencias	FF/Año	Consecuencias	FF/Año	Consecuencias
Compresión 3	42,63	116,88	18,88	115,75	2,44	115,06
Generación de Potencia 3	41,40	126,11	16,23	124,87	1,28	124,07
Depuración 3	24,78	114,62	9,73	114,24	0,84	114,02
Enfriamiento 3	21,66	59,82	11,28	51,77	4,12	48,99
Lubricación 3	55,32	185,75	25,28	167,07	5,22	147,89
Tratamiento Anticorrosivo 3	13,44	12,95	6,92	8,29	3,76	4,97
Compresión 4	106,65	116,91	44,45	115,76	4,66	115,06
Generación de Potencia 4	35,74	132,52	15,28	125,92	1,64	124,01
Depuración 4	41,06	115,85	16,56	114,74	1,46	114,07
Enfriamiento 4	21,66	65,73	11,28	53,65	4,12	49,86
Lubricación 4	64,63	200,07	26,84	175,89	3,94	150,27
Tratamiento Anticorrosivo 4	13,44	17,43	6,92	10,44	3,76	5,46
Compresión 3	22,56	123,06	8,92	118,50	0,77	115,32
Generación de Potencia 5	19,88	125,40	8,56	124,80	1,43	124,40
Depuración 5	8,79	139,41	3,78	126,02	0,30	116,71
Enfriamiento	21,66	59,82	11,28	51,77	4,12	48,99
Lubricación 5	69,25	212,96	30,12	194,90	3,18	176,37
Tratamiento Anticorrosivo 5	21,44	12,95	6,92	8,29	3,76	4,97

Fuente: Elaboración Propia

a) Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de las MPCJ para el escenario moderado (ver figura 6.4)

CASO MODERADO						
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta			COMPRESIÓN 4	LUBRICACIÓN 3 / LUBRICACIÓN 4 / LUBRICACIÓN 5
	15 a 20	Alta			COMPRESIÓN 3 / DEPURACIÓN 4	GENERACIÓN DE POTENCIA 3 / GENERACIÓN DE POTENCIA 4
	9 a 14	Media		ENFRIAMIENTO 3 / ENFRIAMIENTO 4 / ENFRIAMIENTO 5	DEPURACIÓN 3	
	5 a 8	Baja	TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 3 / TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 4 / TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 5		COMPRESIÓN 5	GENERACIÓN DE POTENCIA 5
	<5	Muy Baja				DEPURACIÓN 5
		Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
		0-40	41-81	82-122	123-163	>164
Consecuencia de la Falla (MM\$)						

Figura 6.4. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Moderado)

Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior se muestra la matriz de criticidad actual de los sub-sistemas pertenecientes a cada Sistema de Compresión Centrífugo, donde se observa que los más críticos son los de Lubricación 3, 4 y 5, debido principalmente a la cantidad de equipos asociados a ellos considerados en el análisis (13 equipos por cada uno), afectando sin lugar a dudas en la frecuencia de fallas y consecuencias, por lo que se debe tener especial atención en su mantenimiento, además de que estos sub-sistemas son claves para el buen funcionamiento del tren de compresión

(motor, caja y compresores). De igual manera se encuentran en la zona de alta criticidad los Sub-Sistemas de Compresión 3 y 4, Generación de Potencia 3 y 4, y el de Depuración 4, los que requieren igualmente de acciones que logren reducir su nivel de criticidad.

b) Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de las MPCJ para el escenario optimista (ver figura 6.5).

		CASO OPTIMISTA						
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta						
	15 a 20	Alta						
	9 a 14	Media						
	5 a 8	Baja						
	<5	Muy Baja	TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 3 / TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 4 / TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 5	ENFRIAMIENTO 3 / ENFRIAMIENTO 4 / ENFRIAMIENTO 5	COMPRESIÓN 3 / DEPURACIÓN 3 / COMPRESIÓN 4 / DEPURACIÓN 4 / COMPRESIÓN 5 / DEPURACIÓN 5	GENERACIÓN DE POTENCIA 3 / LUBRICACIÓN 3 / GENERACIÓN DE POTENCIA 4 / LUBRICACIÓN 4 / GENERACIÓN DE POTENCIA 5	LUBRICACIÓN 5	
		Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta		
		0-40	41-81	82-122	123-163	>164		
		Consecuencia de la Falla (MM\$)						

Figura 6.5. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Optimista)

Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior se puede apreciar que si se ejecutan las estrategias y/o acciones de mantenimiento correctas, se puede reducir el nivel de criticidad de la mayoría de los sub-sistemas (caso optimista), obteniendo como beneficio la confiabilidad operacional de las Miniplantas, motivo principal por lo que se llevó a cabo el presente estudio.

c) Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de las MPCJ para el escenario pesimista (ver figura 6.6).

		CASO PESIMISTA					
Frecuencia de Falla (Año)	>20	Muy Alta		ENFRIAMIENTOS 3 / ENFRIAMIENTO 4 / ENFRIAMIENTO 5	COMPRESIÓN 3 / DEPURACIÓN 3 / COMPRESIÓN 4 / DEPURACIÓN 4	GENERACIÓN DE POTENCIA 3 / GENERACIÓN DE POTENCIA 4 / COMPRESIÓN 5	LUBRICACIÓN 3 / LUBRICACIÓN 4 / LUBRICACIÓN 5
	15 a 20	Alta				GENERACIÓN DE POTENCIA 5	
	9 a 14	Media	TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 3 / TRATAMIENTO ANTICORROSIVO 4 / TRATAMIENTO			DEPURACIÓN 5	
	5 a 8	Baja					
	<5	Muy Baja					
			Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			0-40	41-81	82-122	123-163	>164
		Consecuencia de la Falla (MM\$)					

Figura 6.6. Matriz de Criticidad de los Sub-Sistemas de MPCJ (Pesimista)

Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior se observa que de no ejecutarse las acciones requeridas por la planta, casi todos los sub-sistemas pasarían al nivel de criticidad alto “A”, a excepción de los de Enfriamiento y los de Tratamiento Anticorrosivo, pudiéndose generar de esta manera gran cantidad de paros en un año en la planta, lo que afecta los costos de mantenimiento y producción.

En las matrices de criticidad presentadas anteriormente para los tres (3) escenarios evaluados (optimista, moderado y pesimista) se pudo observar donde se ubican en la actualidad los sub-sistemas en cuanto a criticidad se refiere, así como la variación en la ubicación en la matriz en caso de que se ejecuten las estrategias de mantenimiento adecuadas para garantizar la operatividad del activo y para el caso en que no se ejecuten dichas acciones y/o estrategias.

De los sub-sistemas pertenecientes a cada sistema de compresión centrífugo (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5), con un total de 18 sub-sistemas, se determinó que para el escenario moderado (actual) un número de ocho (8) sub-sistemas se encuentran en el nivel de alta criticidad “A”, representando un 44%; siete (7) en el nivel medio “B”, representando un 39% y tres (3) sub-sistemas restantes se ubican en el nivel bajo de criticidad “C”, constituyendo el 17% de los sub-sistemas. En la grafica 6.7 se muestra gráficamente el porcentaje de sub-sistemas que se encuentran en cada nivel de criticidad.



Gráfica 6.7. Porcentaje de Sub-Sistemas en los Niveles de Criticidad

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6.9 se muestra un resumen de la jerarquización de los sub-sistemas de las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ) para cada uno de los escenarios evaluados, lo que permite visualizar con mayor facilidad los cambios en los niveles de criticidad por cada escenario.

Al comparar los resultados de la tabla 6.9 en cuanto a ubicación de los sub-sistemas en cada escenario, se puede notar que existe una variación considerable en cada uno, debido a que en el pesimista un total de 11 sub-sistemas de 17 se encontrarían en alta criticidad y al pasar al escenario optimista solo uno se seguiría encontrando en este nivel, lo que facilita la toma de decisiones por parte de las Gerencias responsables (Plantas de Gas y Agua y Mantenimiento) para garantizar la confiabilidad operacional de la planta al observar el cambio significativo (positivo) en cuanto criticidad de sub-sistemas de la planta.

Tabla 6.9. Comparación de Ubicación de Sub-Sistemas en Escenarios Evaluados

Nivel de Criticidad	Optimista	Moderado	Pesimista
Alto "A"	Lubricación 5	Lubricación 3 / Lubricación 4 / Lubricación 5 / Generación de Potencia 3 / Generación de Potencia 4 / Compresión 3 / Compresión 4 / Depuración 3 / Depuración 4 /	Lubricación 3 / Lubricación 4 / Lubricación 5 / Generación de Potencia 3 / Generación de Potencia 4 / Compresión 3 / Compresión 4 / Depuración 3 / Depuración 4 / Depuración 5 / Generación de Potencia 5 / Depuración 5
Medio "B"	Generación de Potencia 3 / Lubricación 3 / Generación de Potencia 4 / Aceite 4 / Generación de Potencia 5	Depuración 3 / Compresión 5 / Generación de Potencia 5 / Depuración 5 / Enfriamiento 3 / Enfriamiento 4 / Enfriamiento 5	Enfriamiento 3 / Enfriamiento 4 / Enfriamiento 5
Bajo "C"	Compresión 3 / Depuración 3 / Compresión 4 / Depuración 4 / Compresión 5 / Depuración 5 / Enfriamiento 3 / Enfriamiento 4 / Enfriamiento 5 / Tratamiento Anticorrosivo 3 / Tratamiento Anticorrosivo 4 / Tratamiento Anticorrosivo 5	Tratamiento Anticorrosivo 3 / Tratamiento Anticorrosivo 4 / Tratamiento Anticorrosivo 5	Tratamiento Anticorrosivo 3 / Tratamiento Anticorrosivo 4 / Tratamiento Anticorrosivo 5

Fuente: Elaboración Propia

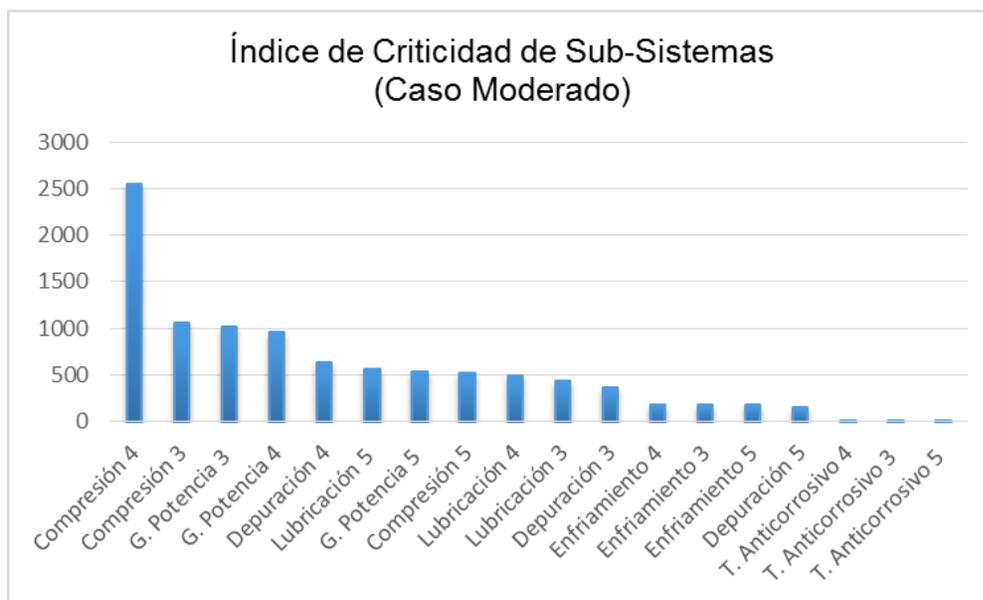
Además de los resultados en la frecuencia de fallas y consecuencias por sub-sistemas también se obtuvo el índice de criticidad correspondiente a cada uno, en la tabla 6.10 se muestran el índice de criticidad por sub-sistema para el escenario moderado en orden descendente.

Tabla 6.10. Índice de Criticidad por Sub-Sistemas para el Caso Moderado

Sub-Sistema	Índice de Criticidad (MM\$)
Compresión 4	2545,09
Compresión 3	1062,90
Generación de Potencia 3	1010,98
Generación de Potencia 4	960,00
Depuración 4	630,91
Lubricación 5	560,33
Generación de Potencia 5	531,94
Compresión 5	525,39
Lubricación 4	486,95
Lubricación 3	435,17
Depuración 3	370,01
Enfriamiento 4	176,13
Enfriamiento 3	174,81
Enfriamiento 5	174,81
Depuración 5	148,69
Tratamiento Anticorrosivo 4	9,71
Tratamiento Anticorrosivo 3	8,78
Tratamiento Anticorrosivo 5	8,78

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 6.8 se puede observar gráficamente los resultados del índice de criticidad de los sub-sistemas para el escenario moderado, DONDE se evidencia lo ya mostrado en la matriz de criticidad moderada, que los sub-sistemas de compresión 3 y 4 son los más críticos, afectando negativamente la producción.



Gráfica 6.8. Criticidad de Sistemas para el Caso Moderado

Fuente: Elaboración Propia

Análisis de los Resultados de Criticidad

A continuación se presenta un resumen de los sistemas ubicados en el nivel de alta criticidad “A” en las matrices realizadas para cada escenario:

- **Moderado:** Se ubican en alta criticidad los sistemas de Compresión Centrífugo 3, Compresión Centrífugo 4, Compresión Centrífugo 5, Facilidades de Entrada y Facilidades de Salida.
- **Optimista:** Se encuentran en el nivel de alta criticidad Compresión Centrífugo 4, Compresión Centrífugo 3, Compresión Centrífugo 5 y Facilidades de Salida.
- **Pesimista:** Los sistemas con alta criticidad en este caso son Compresión Centrífugo 3, Compresión Centrífugo 4, Compresión Centrífugo 5, Facilidades de Entrada, Facilidades de Salida y el Sistema de Detección de Fuego y Gas.

Además, se tienen de igual manera los sub-sistemas ubicados en el nivel de alta criticidad “A” de acuerdo con las matrices de criticidad realizadas:

- **Moderado:** En este escenario se ubican los sub-sistemas de Lubricación 3, 4 y 5; Compresión 4, Generación de Potencia 3 y 4, Compresión 3 y Depuración 4.
- **Optimista:** Solo se tiene en el nivel de alta criticidad el Sub-Sistema de Lubricación 5.
- **Pesimista:** En este escenario se encuentran en alta criticidad Lubricación 3, 4 y 5; Generación de Potencia 3 y 4, Compresión 5, Generación de Potencia 5, Compresión 3, Depuración 3, Compresión 4 y Depuración 5.

De acuerdo con los resultados obtenidos por índice de criticidad (FF x Consecuencias) se tiene que de los sistemas y sub-sistemas de las Miniplantas Compresoras Jusepín, el sistema con el mayor índice de criticidad es el de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4) con un valor de 4.808,78 MM\$, para el caso de los sub-sistemas se tiene el de Compresión 4 con un índice de criticidad de 2.545,09 MM\$.

A continuación se presentan los análisis correspondientes de cada sistema por el nivel de criticidad en que se ubicaron (escenario moderado), para así poder evidenciar la condición en que estos se encuentran.

a) Nivel de Criticidad “A” (Alta)

Sistema de Facilidades de Entrada: Este sistema está comprendido principalmente por el Depurador de Succión General (10-V-01) y las válvulas de entrada a la planta (reguladora de flujo, presurización, bloqueo) que se encuentran en el área común de las Miniplantas Compresoras, por consiguiente este sistema maneja la cantidad total del flujo de gas (aproximadamente 140 MMPCND). De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de criticidad se evidenció que este sistema se encuentra en criticidad “A” debido a que maneja el total del flujo de las tres Miniplantas y las consecuencias por una determinada falla involucra un alto impacto en la producción.

Por otra parte, se tiene que la última inspección realizada al depurador general de succión por el personal encargado de equipos estáticos fue en el año 2008, sin embargo, se hace necesario una nueva inspección para determinar la condición actual de este depurador, para así tomar acciones que garanticen su confiabilidad operacional y por ende la disminución de su frecuencia de fallas.

Sistema de Facilidades de Salida: Está compuesto principalmente por la Válvula de Descarga de Planta (NVX-1-105), Válvula de Presurización (NVX-1-106) y la Válvula de Venteo de Alta (NVX-1-104); este sistema a pesar de no presentar una alta frecuencia de fallas (según información proporcionada por el personal de la Gerencia de Plantas de Gas y Agua) tiene altas consecuencias en caso de ocurrir una, debido a que esta conlleva al paro de toda la producción (aproximadamente 140 MMPCND), así como también presenta un mayor impacto en la seguridad personal por la presión del gas en la salida de la planta, que es de 1300 psig.

Sistema de Aire de Instrumentos: Este sistema forma parte del área común de las Miniplantas (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5) y fue considerado desde el inicio del estudio como altamente crítico por la condición fuera de servicio que este presenta, siendo tomado el aire de instrumentos de los módulos de producción.

Al tomar el aire de instrumentos desde los módulos de producción se disminuye la autonomía por este concepto en las miniplantas, debido a que no da flexibilidad para la toma de decisiones, además de que se incrementan los paros no programados al dejar de ser suministrado este desde los módulos.

Sistema de Compresión Centrífugo 3: Este sistema está comprendido por el proceso de compresión de la Miniplanta Compresora Jusepín 3 (MPCJ-3), el cual tiene una desviación de producción de gas de 20% aproximadamente con respecto a la de diseño, la mayoría de la frecuencia de fallas de este sistema están asociadas a los subsistemas de Compresión, Generación de Potencia y el de Lubricación, los cuales también resultaron en alta criticidad en el análisis.

Las fallas que han presentado estos sub-sistemas se muestran a continuación, según el histórico de fallas (Año 2013 y 2014):

- ✓ Falla en secuencia de válvulas anti-surge.
- ✓ Vibración en el motor eléctrico principal.
- ✓ Alta temperatura en cilindros del compresor II etapa.
- ✓ Bajo nivel de tanques elevados de sello.
- ✓ Vibración en la caja multiplicadora.
- ✓ Fuga de aceite por las bombas de aceite.

La inspección de equipos dinámicos realizada en Mayo del presente año según Nota Técnica IM-NT-IED-MPJ-002-14 arrojó que los valores globales de amplitud en la caja multiplicadora lado acople motor, se encuentran ligeramente por encima de los valores recomendados por la Norma API 613; sin embargo, se encuentran por debajo de niveles de alarma configurados en el sistema de monitoreo 3500 Bently Nevada. En cuanto al compresor de segunda etapa durante la toma de datos de la unidad se observó una lectura de desplazamiento axial anormal en una de las probetas de proximidad, lo que pudiera estar causando las fallas en este equipo.

Sistema de Compresión Centrífugo 4: Este sistema está comprendido de igual manera por el proceso de compresión de la Miniplanta Compresora Jusepín 4, el cual es el que presenta el mayor índice de criticidad, esto se debe principalmente porque este sistema está manejando un 15% más de producción de gas que los otros sistemas de compresión centrífugo, debido a rediseños en los compresores centrífugos, manteniéndose dentro de su capacidad operativa; además este sistema ha presentado un 11% por encima de ocurrencia de fallas en comparación con el sistema de compresión centrífugo 3.

Igualmente, en el presente análisis se determinó que los sub-sistemas con criticidad “A” para este sistema son: Compresión, Generación de Potencia, Depuración y Lubricación; siendo el Sub-sistema de Compresión el más alto con un 36% de la ocurrencia de fallas de todo el sistema.

Entre los problemas más comunes que han presentado los sub-sistemas mencionados se encuentran:

- ✓ Altas temperaturas en cojinetes de caja multiplicadora.
- ✓ Alta presión de descarga en los compresores centrífugos.

- ✓ Válvulas Anti-surge fuera de posición.
- ✓ Alto nivel de líquido en depuradores.

En la última inspección de equipos dinámicos realizada a la caja multiplicadora y los compresores centrífugos según Nota Técnica IM-NT-IED-MPJ-002-14 correspondiente al mes de Mayo del 2014, se determinó que la caja multiplicadora presenta inestabilidad y amplitud global ligeramente alta generada por el fluido influyendo en su frecuencia de fallas.

Por otra parte, para el compresor centrífugo de primera etapa (40-K-01) se determinó que los valores de vibración se encuentran muy cercanos al límite de alarma, influyendo todo esto en la criticidad del sistema.

Sistema de Compresión Centrífugo 5: Representa el proceso de compresión de la Miniplanta Compresora Jusepín 5, el cual está produciendo aproximadamente un 20% menos con respecto a la capacidad de diseño, para este sistema se tiene que el sub-sistema con un nivel alto de criticidad es el de Lubricación, debido a que representa un factor importante en el funcionamiento de los compresores centrífugos, motor eléctrico principal y la caja multiplicadora; las fallas más comunes asociadas son el bajo nivel de líquido de los tanques (tanque de aceite principal, tanque elevado de aceite de lubricación y los tanque elevados de aceite de sello), la cual da paro a estos equipos.

Otro factor importante en la criticidad del Sub-Sistema de Lubricación es que a este pertenecen un número alto de equipos (13 equipos) tomados en cuenta para el análisis, lo cual afecta en la criticidad del Sub-sistema de Lubricación, y por ende del Sistema de Compresión Centrífugo 5.

También se pudo observar durante el análisis que la frecuencia de fallas asociadas a los Sub-sistemas de Compresión y Generación de

Potencia representan aproximadamente la mitad de las registradas en los del Sistema de Compresión Centrífugo 4, por lo que el Sistema de Compresión Centrífugo 5 es el que presenta una menor frecuencia de fallas con respecto a los otros dos.

b) Nivel de Criticidad “B” (Media)

Sistema de Alivio y Venteo: Está compuesto principalmente por el Despojador de Líquido (11-V-01) y las Bombas de Drenaje de Condensado (P-11-01 y P-11-02), este sistema resultó con un nivel medio de criticidad, debido a que las bombas han venido presentando una mayor frecuencia de fallas (4 veces/año) dando como una de sus consecuencias el paro del Despojador por alto nivel de líquido, siendo está una de las fallas más comunes en este equipo, sin embargo, esta falla no representa altas consecuencias, principalmente porque no afecta la producción de las Miniplantas.

En una inspección realizada en el año 2.008 a las Miniplantas se pudo apreciar que las bombas (P-11-01 y P-11-02) estaban presentando fugas en el área de acople con el motor eléctrico y en sus uniones bridadas, observándose que actualmente estas bombas siguen presentando este problema.

Sistema Eléctrico de Potencia: El análisis de criticidad de este sistema vino dado por la frecuencia de fallas a nivel eléctrico que se presentaron en las Miniplantas Compresoras Jusepín en el período de tiempo Enero 2.013 a Mayo 2.014; donde se determinó que la frecuencia de fallas al año por esta causa es de 30 veces/año, el cual es un valor bastante alto, conllevando así de igual manera a una alta consecuencia en el impacto de producción (paro

total de la planta), sin embargo las consecuencias en cuanto a la seguridad personal, impacto ambiental y los costos de reparación son bajos, quedando así en el nivel de media criticidad.

Es necesario resaltar que para la evaluación de criticidad de este sistema no se asociaron equipos, sino que se tomaron las fallas directas de dicho sistema tal y como fueron registradas en los históricos de fallas.

c) Nivel de Criticidad “C” (Baja)

Sistema de Detección de Gas y Fuego: Está compuesto por 24 Detectores de Fuego y 32 Detectores de Gas instalados en toda la planta (Área Común, MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5), según la taxonomía definida en el presente trabajo de investigación; este sistema se encuentra en el nivel de baja criticidad con un total de cinco (5) fallas al año aproximadamente, la más común viene dada por falsas alarmas, ya que los detectores generalmente captan el humo o luz generado en actividades de mantenimiento llevadas a cabo en la planta, dando como consecuencia el paro y por consiguiente un impacto en la producción, sin embargo los resultados de la criticidad lo ubican como un sistema de criticidad “C” principalmente por su baja frecuencia de fallas.

Sistema de Informática, Comunicación y Control: Para el análisis de criticidad de este sistema se tomó en cuenta la información contemplada en los históricos de fallas desde Enero del 2.013 hasta Mayo del 2.014, donde se evidenció la baja frecuencia de fallas (4 fallas/año) que ha presentado este sistema; dentro de estas fallas se encuentran:

- ✓ Falla en el PLC del área común.
- ✓ Falla de comunicación en el PLC de MPCJ-5.

- ✓ Falla en el PLC debido al calentamiento de tarjeta por causa del aire acondicionado dañado en MPCJ-3.

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

Es una filosofía de gestión del mantenimiento la cual se encarga de optimar la confiabilidad de un sistema en su contexto operacional, estableciendo las tareas de mantenimiento más efectivas en función de la criticidad de dicho sistema, tomando en cuenta las posibles consecuencias que originarán los modos de fallas a la seguridad, al ambiente y a las operaciones.

El proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) contempló el establecimiento de las tareas de mantenimiento a partir de un Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) a los sistemas con un nivel de criticidad "A", siendo en el presente estudio los tres (3) Sistemas de Compresión Centrífugo (MPCJ-3, MPCJ-4 y MPCJ-5), sin embargo, el proceso de MCC se se llevó a cabo para un solo Sistema de Compresión Centrífugo, debido a que el análisis realizado aplica para los tres, debido a que como se explicó en el capítulo V fueron construidos e instalados de forma idéntica.

La recolección de la información en todas las etapas del MCC fue realizada con el Equipo Natural de Trabajo y esta fue consolidada en el formato que establece la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 "Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo", además, los equipos asociados a cada sub-sistema fueron tomados de la taxonomía establecida en este trabajo de investigación.

Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF)

En esta etapa del MCC se identificaron las funciones, fallas funcionales, modos de fallas, efectos, severidad y las consecuencias asociadas al modo de falla.

- **Funciones:** Fueron identificadas las funciones (primarias y/o secundarias de los equipos pertenecientes a cada sub-sistema de acuerdo con los estándares de desempeño que son aceptables por la Gerencia de Plantas de Gas y Agua.
- **Fallas Funcionales:** Representan la incapacidad del activo para cumplir con sus funciones, ya sea total o parcial; estas fueron analizadas para cada equipo.
- **Modos de Falla:** Se contemplaron todas las causas de cada falla funcional definida, estas causas se denominan “Modos de Falla” y se identificaron todos los probables en el contexto operacional actual.
- **Efectos:** Se determinó que pasa cuando ocurre un modo de falla específico en el proceso (efecto inicial y final).
- **Severidad:** Estuvo enmarcada en tres (3) categorías; severidad baja, media o alta; seleccionando una de acuerdo a los efectos y el impacto del modo de falla.
- **Consecuencias:** Se identificó si los modos de falla listados generan consecuencias ocultas, a la seguridad del personal, al ambiente o las operaciones (producción).

En la figura 6.7 se puede observar como ejemplo el Análisis de Modos y Efectos de Falla realizado al transmisor de presión de la succión del compresor de primera etapa (PT-X-102).

Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa de la Falla)	Frecuencia	Patrón	Efecto Inicial de la Falla (Que ocurre cuando Falla)	Efecto Final de la Falla o Consecuencia (Que ocurre cuando Falla)	Severidad	Tipo de consecuencia				
								Oculta	Seguridad	Ambiente	Operacional	No Operacional
2 Transmisor de Presión (PT-X-102) de Succión del Compresor: Generar una indicación/señal de presión de entrada del gas al compresor de primera etapa (X0-K-01) para alimentar el sistema de Control Antioleaje (Surge).	A No genera una señal de la presión de succión del gas del compresor X0-K-01	1 Transmisor no opera	1/2 años	Aleatorio	No hay señal de presión de succión provocando la apertura de válvula antisurge	El compresor puede entrar en recirculación por lo que baja el volumen de compresión	Media				X	
		2 Lazo abierto o en corto circuito	1/2 años	Aleatorio	Pérdida de tensión de alimentación del transmisor	El compresor puede entrar en recirculación por lo que baja el volumen de compresión	Media	X				
		3 Bloqueo de válvulas de proceso (obstrucción o manipulación)	1/ año	Aleatorio / Gradual	Baja presión en la línea de succión provocando señal de presión baja	El compresor puede entrar en recirculación por lo que baja el volumen de compresión	Media				X	
	B Generar oscilaciones en la señal o una señal errónea de baja o alta presión de succión del gas del compresor X0-K-01	1 Transmisor desajustado	1/2 años	Gradual	Se genera una señal falsa de presión induciendo paros irreales	El compresor puede entrar en recirculación o puede pararse por falsa alarma	Media				X	

Figura 6.7. Análisis de Modos y Efectos de Falla de Transmisor de Presión
Fuente: Elaboración Propia

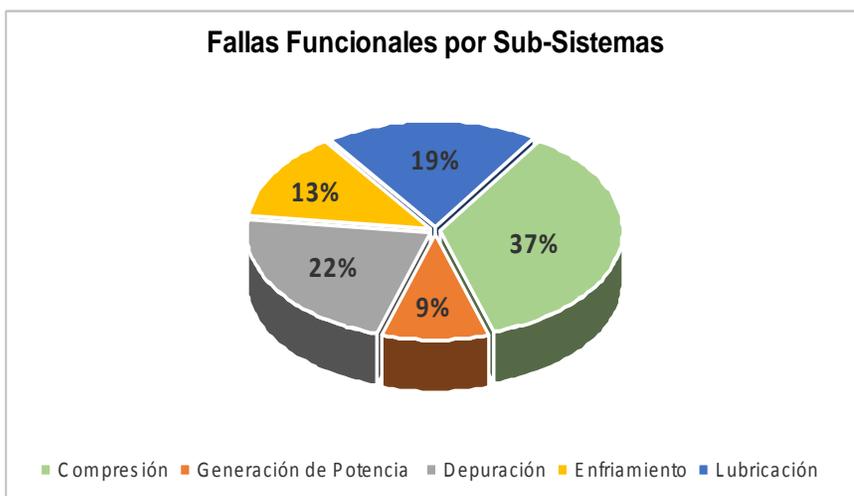
El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) realizado para los Sub-Sistemas de Compresión, Generación de Potencia, Enfriamiento y Lubricación dio como resultado lo mostrado en la tabla 6.11, donde se muestra el total de equipos, funciones, fallas funcionales y modos de falla por cada uno.

Tabla 6.11. Resultados del AMEF para cada Sistema de Compresión Centrífugo

Sistema de Compresión Centrífugo				
Sub-Sistema	Equipos	Funciones	Fallas Funcionales	Modos de falla
Compresión	25	25	46	172
Generación de Potencia	2	6	12	56
Depuración	12	12	28	73
Enfriamiento	7	7	17	95
Lubricación	16	15	24	79
TOTAL	62	65	127	475

Fuente: Elaboración Propia

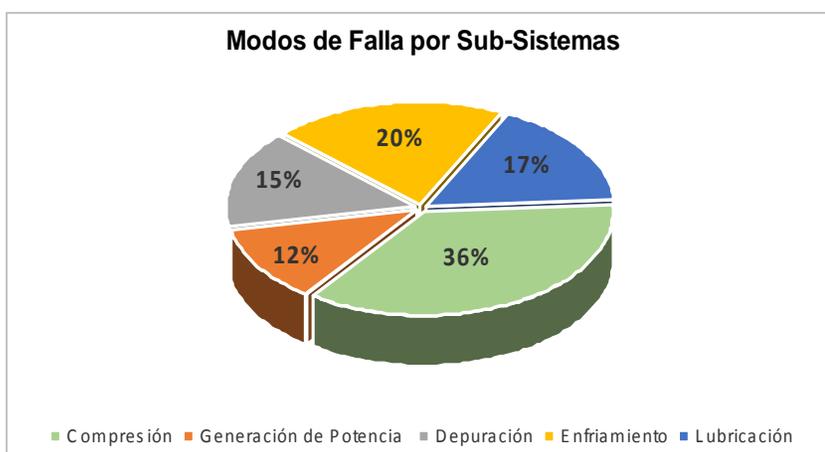
De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6.11 se generaron las gráficas de fallas funcionales (ver gráfica 6.9) y modos de falla (ver gráfica 6.10) de los sub-sistemas y de esta forma observar de manera más clara su comportamiento.



Gráfica 6.9. Fallas Funcionales por Sub-Sistemas

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica anterior se puede apreciar que el sub-sistema con el mayor número de fallas funcionales fue el de compresión, esto debido a número de instrumentos y válvulas considerados como equipos en la taxonomía y que están asociados a los compresores centrífugos, aumentando la probabilidad del incumplimiento de la función del subsistema si no se toman acciones de mantenimiento que garanticen la continuidad operacional.



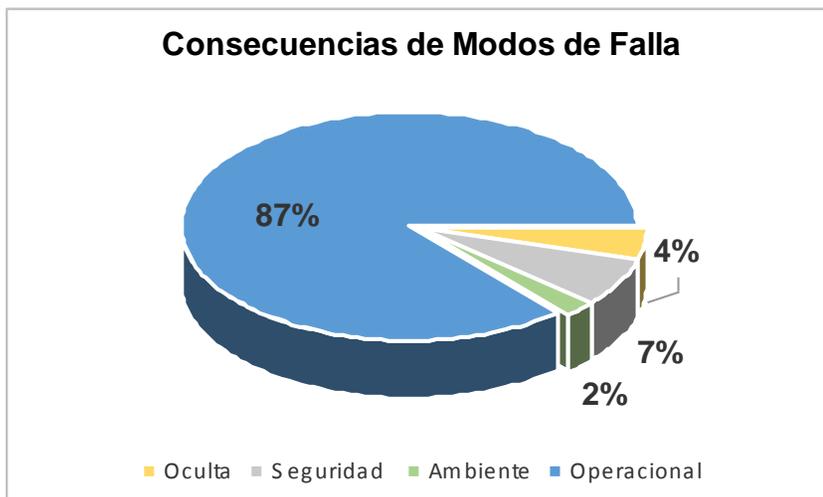
Gráfica 6.10. Modos de Falla por Sub-Sistemas

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la gráfica 6.10 el sub-sistema que presentó un mayor número de modos de falla en el análisis realizado fue el de compresión, con un 36%, esto se debe principalmente por que los compresores centrífugos tuvieron asociados un número significativo de modos de falla (41 por cada compresor), evidenciándose de esta forma el nivel de criticidad de estos equipos.

El Segundo Sub-Sistema con más número de modos de fallas fue el de enfriamiento con el 20% de los modos de falla identificados, debido a que un enfriador presentó 24 modos de falla probables, con un total de 96 por los cuatro (4) enfriadores pertenecientes a cada Sistema de Compresión Centrífugo.

Por otra parte, en el AMEF realizado se clasificaron las consecuencias de los modos de falla, la distribución de esta clasificación por sub-sistema se muestra en la gráfica 6.11, observándose que el 87% de las consecuencias son operacionales, es decir, que afectan la producción de gas y por ende, la satisfacción del cliente (Planta IFG y MUSCAR), donde las consecuencias ocultas, a la seguridad y al ambiente constituyen el 13% restante.



Gráfica 6.11. Consecuencias de Modos de Falla

Fuente: Elaboración Propia

Tareas de Mantenimiento

Luego de realizar el Análisis de Modos y Efectos de Falla, se procedió a la definición de las tareas de mantenimiento para mitigar o eliminar cada modo de falla identificado, como primer paso en la definición de tareas según el MCC se estableció el tipo de tarea que se debe realizar, considerando el árbol lógico de decisiones propuesto por la Norma SAE JA1012 “*A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*”, para seleccionar el tipo de tarea técnicamente factible para cada modo de falla. Los tipos de tareas que establece el MCC son:

- Predictiva Basado en Condición.
- Preventiva Cíclica Detectiva.
- Preventiva Sustitución Basado en Tiempo
- Correctiva Operará hasta la Falla
- Búsqueda de Falla
- Rediseño

Luego de establecida el tipo de tarea se procedió a la descripción de la misma, identificando la frecuencia con debería realizarse, el nivel de mantenimiento según Norma técnica PDVSA MM-01-01-03 “Tipos y Niveles de Mantenimiento”, los responsables de su ejecución (mecánica, electricidad, general, instrumentación, taller de válvulas, predictivo o el operador), las horas-hombres necesarias y el recurso a utilizar. A continuación se muestran los resultados para cada uno de estos factores evaluados. En la figura 6.8 se pueden observar las tareas de mantenimiento propuestas para el transmisor de presión de succión del gas del compresor de primera etapa.

Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa de la Falla)	Tipo de Tareas						Descripción de las Tareas Propuestas	Frecuencia de Mantenimiento	Nivel de Mantenimiento	Ejecutor	H-H
			Predictiva Basado en Condición	Preventiva Cíclica Detectiva	Preventiva Sustitución Basado en Tiempo	Correctiva Operativa Hasta la Falla	Búsqueda de Falla	Rediseño					
2 Transmisor de Presión (PT-X-102) de Succión del Compresor: Generar una indicación/señal de presión de entrada del gas al compresor de primera etapa (X0-K-01) para alimentar el sistema de Control Antioleaje (Surge).	A No genera una señal de la presión de succión del gas del compresor X0-K-01	1 Transmisor no opera		X				Verificación de alimentación eléctrica del transmisor	Semestral	2	Instrumentación	2x2	
				X				Verificación del ajuste del transmisor	Semestral	2	Instrumentación	2x2	
		2 Lazo abierto o en corto circuito		X				Verificación del cableado de alimentación del transmisor y fuente de alimentación	Semestral	2	Instrumentación	1x1	
		3 Bloqueo de válvulas de proceso (obstrucción o manipulación)		X				Revisión de válvulas de bloqueo	Trimestral	2	Instrumentación	1x0,5	
			X				Drenaje de las líneas de proceso	Trimestral	2	Instrumentación	1x0,5		
B Generar oscilaciones en la señal o una señal errónea de baja o alta presión de succión del gas del compresor X0-K-01	1 Transmisor desajustado		X				Verificación y ajuste del transmisor	Semestral	2	Instrumentación	2x2		

Figura 6.8. Tareas de Mantenimiento Modos de Falla Transmisor

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6.12 se puede observar el número de tareas de mantenimiento establecidas en el proceso del MCC para cada sub-sistema estudiado perteneciente al Sistema de Compresión Centrífugo.

Tabla 6.12. Total de Tareas de Mantenimiento establecidas en el MCC

Sistema de Compresión Centrífugo						
Sub-Sistema	Predictiva Basado en Condición	Preventiva Cíclica Detectiva	Preventiva Sustitución Basado en Tiempo	Correctiva Operara Hasta la Falla	Búsqueda de Falla	Rediseño
Compresión	42	155	4	0	0	0
Generación de Potencia	32	33	0	0	0	0
Depuración	26	60	0	0	0	0
Enfriamiento	59	70	0	0	0	0
Lubricación	11	76	0	5	0	0
TOTAL	170	394	4	5	0	0

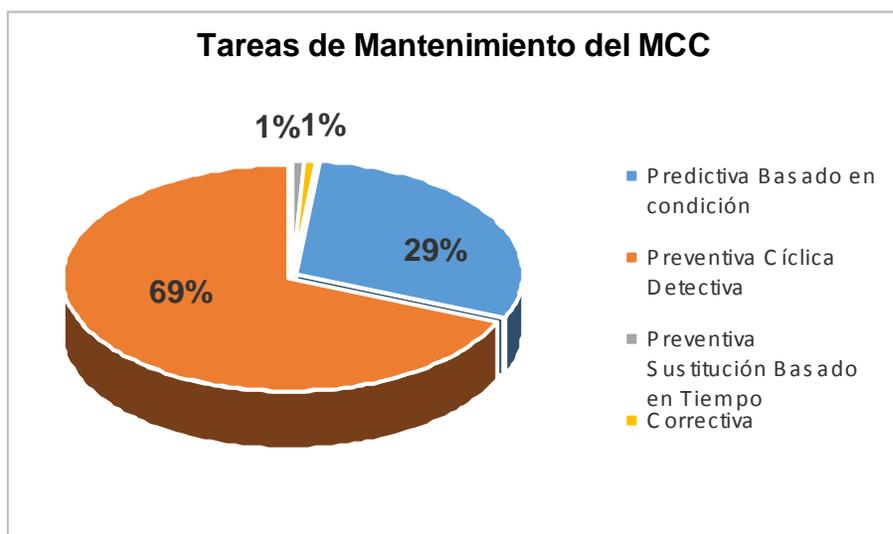
Fuente: Elaboración Propia

Así mismo en el gráfico 6.12 se muestra de manera porcentual el total de actividades por tipo de tarea de mantenimiento, observándose que el 69 % de las tareas son de tipo preventivas cíclicas detectivas orientadas a garantizar el correcto funcionamiento de la unidad tomando acciones tempranas para la detección de posibles fallas en el sistema.

Además, 29% de las tareas son predictivas, es decir, éstas se basan en la detección anticipada de los modos de falla utilizando técnicas especializadas en el monitoreo de las variables indicadoras del deterioro de la condición de un determinado equipo, como lo son los análisis de vibraciones, análisis de aceite, medición de espesores, entre otras.

Por otra parte, se puede observar que el número de las tareas orientadas a la sustitución basada en tiempo y la correctiva operar hasta la falla fueron casi escasas, debido a que en la evaluación realizada con el

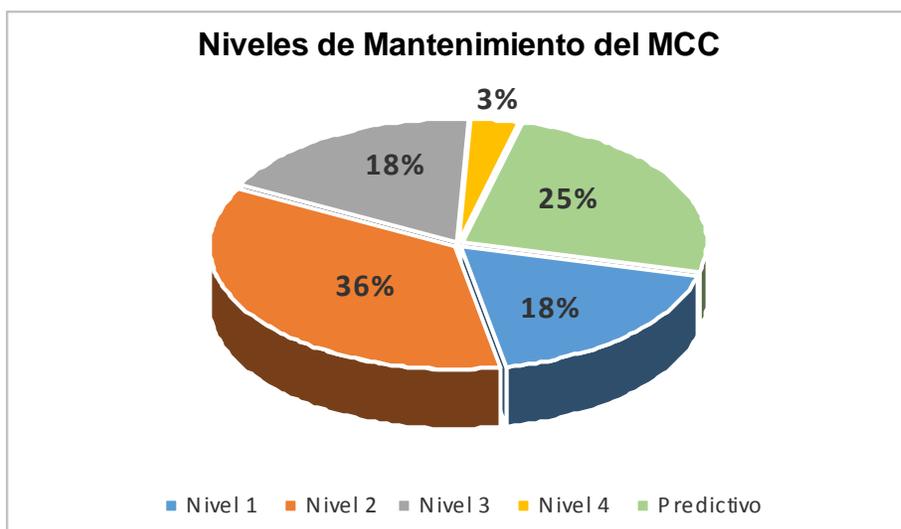
Equipo Natural de Trabajo de la factibilidad técnica de ejecutar este tipo de tareas se tomo como premisa que estas serían establecidas en caso de no encontrar la factibilidad en la detectiva y preventiva cíclica detectiva.



Gráfica 6.12. Tareas de Mantenimiento del MCC

Fuente: Elaboración Propia

Todas las tareas de establecidas llevan asociadas su nivel de mantenimiento, tal y como lo requiere el proceso de MCC, estos niveles fueron definidos según lo establecido en la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03, donde el principal criterio para su definición es el grado en que se compromete la continuidad operacional del equipo, en la gráfica 6.13 se puede observar como quedaron distribuidos los niveles de mantenimiento; es necesario resaltar que las tareas predictivas no pertenecen a ningún nivel.



Gráfica 6.13. Niveles de Mantenimiento del MCC

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica anterior se observa que el mayor porcentaje de tareas pertenecen al nivel 2 de mantenimiento, con un 36%, lo que significa que la mayoría de las tareas establecidas en el MCC no comprometen la continuidad operacional o el arranque del equipo en mantenimiento; seguidas por el 25% de tareas predictivas, las cuales permiten que el equipo se encuentre en servicio para ser ejecutadas, lo que representa beneficios en la gestión de mantenimiento, debido a que permite que el cliente (Gerencia De Plantas de Agua y Gas) continúe la producción de gas.

Por otra parte se tiene que el 36% de tareas son niveles 1 y 2, con un 18% cada uno, el nivel 1 de mantenimiento involucra las actividades que no requieren desmontaje, apertura o parada del equipo, así como registros de parámetros operacionales, este es ejecutado por el operador de la planta y no por la Gerencia de Mantenimiento; en el caso de las tareas de mantenimiento pertenecientes al nivel 3 si comprometen la continuidad operacional o el arranque del activo.

Por último, se observa que solo el 3% de las tareas propuestas pertenecen al nivel 4 de mantenimiento, lo que implica que en el estudio no se recomiendan numerosas tareas que se encarguen de la restitución parcial de los equipos, además no resultaron tareas en el nivel 5 (orientadas al rediseño del equipo), debido a que esto representaría grandes evaluaciones por parte de personal especializado.

En el proceso de MCC también se identificaron las disciplinas responsables de las tareas de mantenimiento propuestas, en la gráfica 6.14 se aprecia que la disciplina de Mantenimiento de Instrumentación es la que tiene el mayor porcentaje de tareas, seguido de Mantenimiento Predictivo con el 25% de la responsabilidad, a su vez el operador tiene el 18% seguido de Mecánica con 13%; las disciplinas de Electricidad, General y Taller de Válvulas tienen el 10% restante.



Gráfica 6.14. Disciplinas Responsables de Tareas de Mantenimiento del MCC

Fuente: Elaboración Propia

Recursos Necesarios para la Ejecución de las Tareas Propuestas

A continuación se listan las herramientas necesarias para ejecutar las tareas de mantenimiento propuestas en el MCC por cada disciplina:

- **Mecánica:**

- ✓ Juego de llaves combinadas.
- ✓ Mandarria de bronce.
- ✓ Llave de golpe.
- ✓ Juego de destornilladores.
- ✓ Base magnética.
- ✓ Comparadores de carátula.
- ✓ Extractores hidráulicos.
- ✓ Micrómetros interiores y exteriores.
- ✓ Grasea.
- ✓ Goniómetro.
- ✓ Trapos.
- ✓ Ayudante mecánico.
- ✓ Verniel.
- ✓ Lija.
- ✓ Taladro.
- ✓ Mecha.
- ✓ Juego de llaves allen.
- ✓ Centro punto.
- ✓ Granete.
- ✓ Montacarga.
- ✓ Extractor.
- ✓ Alicata universal con mango aislante eléctrico (alicata de electricista).

- **General:**

- ✓ Andamio.
- ✓ Mandarria de bronce.
- ✓ Juego de llaves combinadas.
- ✓ Llave de golpe.
- ✓ Hidrojet.
- ✓ Brazo hidráulico.
- ✓ Trapos.
- ✓ Montacarga.
- ✓ Química desengrasante (biodegradable).
- ✓ Bolsas de basura.

- **Instrumentación:**

- ✓ Multímetro.
- ✓ Juego de llaves combinadas.
- ✓ Teipe aislante.
- ✓ Juego de destornilladores con mango aislante eléctrico.
- ✓ Juego de dados.
- ✓ Juego de llaves combinadas.
- ✓ Juego de llaves allen.
- ✓ Limpiador de contactos.
- ✓ Desplazador de humedad.
- ✓ Comunicador HART.
- ✓ Juego de llaves fijas.
- ✓ Química desengrasante (biodegradable).

- **Predictivo:**

- ✓ Instrumento de procesamiento de señal dinámica.
- ✓ Lapto.

- ✓ Cámara termográfica.
- ✓ Equipo de ultrasonido (DMS 2).
- ✓ Gel acoplante.

- **Electricidad:**

- ✓ Juego de destornillador.
- ✓ Medidor de aislamiento (megger).
- ✓ Pinza amperimétrica.
- ✓ Limpiador de contactos.
- ✓ Desplazador de humedad.
- ✓ juego de llaves combinadas.
- ✓ Rache.
- ✓ Trapos.
- ✓ Solvente dieléctrico.
- ✓ Desplazador de humedad.
- ✓ Limpia contactos.
- ✓ Terminales.
- ✓ Teipe aislante.
- ✓ Marcadores.
- ✓ Marquillas.
- ✓ Etiquetas.
- ✓ Juego de llaves allen.
- ✓ Navaja.
- ✓ Ohmímetro.
- ✓ Aspiradora.
- ✓ Equipo para medición de puesta a tierra.
- ✓ Destornillador de bornera.

En el apéndice 7 se muestran todas las plantillas del MCC realizado al Sistema De Compresión Centrífugo perteneciente a las Miniplantas Compresoras Jusepín.

Plan de Mantenimiento de las Miniplantas Compresoras Jusepín

Luego de culminado el proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se generó el Plan de Mantenimiento Preventivo a partir de las tareas que fueron propuestas, involucrando su frecuencia de ejecución, los responsables, el nivel de mantenimiento y las horas-hombres requeridas; para esto se llevó a cabo la depuración de las tareas, seleccionando una sola vez las tareas iguales para un determinado equipo que atacan distintos modos de falla.

La Generación del Plan de Mantenimiento Preventivo se realizó en el formato establecido en la Norma Técnica PDVSA MM-02-02-01 “Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo”, el cual contiene los requisitos mínimos requeridos para la carga en el Sistema de Gestión de Control de Mantenimiento (SAP PM); en la figura 6.9 se muestra como ejemplo el plan generado para los compresores centrífugos de las Miniplantas Compresoras Jusepín.

PDVSA		RESUMEN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO					Compresores Centrífugos Tipo BCL-405 y BCL-307A.							
PREDICTIVO, MECÁNICA, GENERAL, OPERADOR		—				FRECUECIA								
PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA COMPRESORES CENTRÍFUGOS	Duración de Labor-hrr.	Resp.	Requiere Planta F/S	Requiere Equipo F/S	Nivel de Msta	FRECUECIA								
						1D	1S	1M	6M	1A	2A	4A		
1. Análisis de vibración en los cojinetes del compresor.	4,00	M (P)	NO	NO	-			✓						
2. Prueba de eficiencia en el compresor.	16,00	M (P)	NO	NO	-						✓			
3. Revisión de la condición del filtro (strainer) en la succión del compresor.	2,00	M (G)	SI	SI	3							✓		
4. Drenar los líquidos por la parte de abajo del compresor.	0,25	O	NO	NO	1		✓							
5. Verificación de valores de alineación entre compresores y caja multiplicadora	4,00	M (M)	SI	SI	3								✓	
6. Verificación de la condición de las bridas de succión y descarga del compresor.	4,00	M (M)	NO	NO	2							✓		
7. Revisión de la condición de los impulsores e internos del compresor.	4,00	M (M)	SI	SI	4									✓
8. Verificación de variables de proceso (presión y temperatura del gas).	0,25	O	NO	NO	1	✓								
9. Análisis de aceite lubricante.	1,00	M (P)	NO	NO	-				✓					
10. Verificación del flujo de gas manejado del compresor	0,25	O	NO	NO	1	✓								
11. Inspección visual para detectar fugas de gas en tuberías y accesorios del compresor	0,25	O	NO	NO	1	✓								
12. Medición de espesores con ultrasonido (inspección no intrusiva) en tuberías y accesorios del compresor.	4,00	M (P)	NO	NO	-								✓	
Total Labor-Horas-Hombres/Actividad	40,00					0,75	0,25	1,00	0,00	26,00	4,00	4,00		
Total Labor-Horas-Hombres/Año	316,50					262,50	13,00	12,00	0,00	26,00	2,00	1,00		
Total Labor-Horas-Hombres en Parada														
RESPONSABLES:														
M MANTENIMIENTO		C INFIABILIDAD			O OPERACIONES				INSPECCION					
Total de Equipos del Plan													6	
Total Horas Hombres por Total de Equipos													1839	
Expectativa de Operación Continua														
Expectativa de operación continua: ---														
Equipos involucrados: 30-K-01, 30-K-02, 40-K-01, 40-K-02, 50-K-01, 50-K-02														

Figura 6.9. Plan de Mantenimiento de Compresores Centrífugos

Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior del plan de mantenimiento se observan además las horas requeridas para la ejecución de las tareas propuestas, tomadas del MCC realizado, calculando de esta manera el total de las Horas-Hombre anuales requeridas en función del total de equipos asociados a una plantilla; por otra parte al generar el plan se hizo necesario identificar si las tareas requieren de que el equipo y/o la planta estén fuera de servicio.

En el apéndice 6 se presentan las 18 plantillas del Plan de Mantenimiento Preventivo de las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ), con lo que se cumple el objetivo general del presente trabajo de investigación, Diseñar el Plan de Mantenimiento Basado en el Enfoque de Confiabilidad para las Miniplantas Compresoras Jusepín.

Reducción de Horas-Hombre y Mejoras del Plan de Mantenimiento Propuesto

El Plan de Mantenimiento propuesto para las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ) pretende anticiparse a los modos de falla que puedan ocurrir durante el proceso de compresión del gas natural con tareas de mantenimiento técnicamente factibles que aporten beneficios a la corporación (Gerencia de Plantas de Agua y Gas y la Gerencia de Mantenimiento) y así aumentar las disponibilidad y por ende la confiabilidad de la planta.

Dentro de los beneficios que se pueden atribuir al plan de mantenimiento propuesto en el presente trabajo de investigación en comparación con el actual implementado por la Gerencia de Mantenimiento se tienen:

Horas-Hombre requeridas: Uno de los beneficios del Plan de Mantenimiento Propuesto se refleja en la cantidad de Horas-Hombre

requeridas para la ejecución de todas las tareas propuestas, de donde se pudo determinar que se tendría una reducción de 72,71% de las Horas-Hombre para atender mantenimientos programados, esto excluyendo las H-H atribuidas aloperador de la planta (nivel 1), debido a que en el plan actual de la Gerencia de Mantenimiento se requiere de un total de 15.645 H-H y en el propuesto un total de 4.268 H-H (ver gráfica 6.15).



Gráfica 6.15. Horas-Hombre de Planes de Mantenimiento

Fuente: Elaboración Propia

Tareas de Mantenimiento Predictivo: En el Plan de propuesto se establecieron variedad de tareas de mantenimiento tipo predictivas, que buscan la detección de una determinada falla a través de monitoreos constantes al equipo, lo cual trae como principal beneficio la reducción de los tiempos de parada del equipo y/o planta, ya que no se requiere del desarme para realizar inspecciones a componentes internos a unas frecuencias bajas, en la tabla 6.13 se pueden observar algunas de las tareas predictivas propuestas.

Estas tareas en el Plan de Mantenimiento actual no tienen una frecuencia de ejecución que permita la evaluación y/o comportamiento del equipo a través del tiempo, por lo que en el propuesto se busca lograr la recolección de los datos a intervalos mensuales y bimestrales como lo son el caso del análisis de vibraciones y del aceite.

Tabla 6.13. Tareas de Mantenimiento Predictivas

Descripción	Frecuencia
Análisis de Vibraciones	Bimestral
Análisis de Aceite	Mensual
Pruebas de Eficiencia	Anual
Análisis espectral de vibraciones y corriente al motor (MCSA).	Mensual
Medición de espesores con ultrasonido (inspección no intrusiva).	Bienal

Fuente: Elaboración Propia

Tareas de Mantenimiento establecidas según Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03 “Niveles de Mantenimiento”: El plan de Mantenimiento propuesto cumple con los requerimientos de la Norma Técnica PDVSA MM-01-01-03, debido a se evaluó el grado en que se compromete el equipo en la tarea para definir su nivel, lo cual no está comprendido en el plan actual, lo cual trae como beneficio principalmente el entendimiento de un mismo concepto de lo que debe hacerse en los Mantenimientos niveles 2 y 3 por parte de todo el personal de la Gerencia de Mantenimiento, para así orientar las estrategias correctas en la Gestión de Mantenimiento.

Frecuencia de Mantenimiento según Contexto Operacional: El plan de Mantenimiento actual de las Miniplantas Comproseras tiene establecidas solo dos (2) frecuencias de mantenimiento, cada seis (6) semanas y cada 18 semanas, para todas las tareas del plan, es decir, cada 6 semanas se debe realizar una determina tarea sin evaluar si el proceso o el equipo lo amerita;

lo que se buscó en el plan propuesto fue la optimización de dichas frecuencias, debido a que se determinó según la frecuencia de ocurrencia de un modo de falla cual es la frecuencia óptima para realizar esa tarea, que en muchos casos fue tomada una frecuencia mayor (semestral, anual, bienal, entre otras) lo que permite que el personal de mantenimiento no se desgaste realizando tareas que no aportan valor al proceso.

CONCLUSIONES

El presente trabajo consistió en la elaboración de un Plan de Mantenimiento Preventivo a las Miniplantas Compresoras Jusepín basado en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, de donde se establecen las siguientes conclusiones:

1. Se levantó el contexto operacional actual de las Miniplantas, donde se identificó que la MPCJ-3 y MPCJ-4 están operando por debajo de su capacidad de diseño (50 MMPCND), con un 20% de desviación cada una.
2. El Sistema de Aire de Instrumentos correspondiente a las MPCJ se encuentra fuera de servicio, siendo tomado este desde el Módulo de Producción IV, lo que incrementa la frecuencia de fallas en la planta por este concepto.
3. La taxonomía de las MPCJ se clasificó en 10 sistemas y cinco (5) sub-sistemas por cada miniplanta (un total de 15 sub-sistemas), 238 equipos y 434 sub-equipos.
4. Se determinó que el sistema con mayor frecuencia de fallas es el de Compresión Centrífugo 4 (MPCJ-4), según el análisis del histórico de fallas cargado en Centinela AICO.
5. Se realizó el análisis de criticidad donde se determinó que 5 sistemas (Facilidades de Entrada, Facilidades de Salida, Compresión Centrífugo 3, 4 y 5) y 8 sub-sistemas (Compresión 3, Generación de Potencia 3; Lubricación 3; Compresión 4, Generación de Potencia 4; Depuración 4, Lubricación 4 y 5) se encuentran en un nivel de criticidad alto "A".

6. El 87% de los modos de fallas identificados traen consecuencias operacionales (producción, satisfacción al cliente) y el otro 13% a la seguridad, ambiente y ocultas.
7. El 69% de las tareas de Mantenimiento establecidas en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) son del tipo Preventivas Cíclicas Detectivas, 29% son Predictivas Basadas en Condición y el 2% restante son Predictivas Sustitución Basado en Tiempo y Correctivas.
8. El Plan de Mantenimiento Preventivo se creó con un total de 18 plantillas que abarcan todos los equipos pertenecientes a los Sistemas de Compresión Centrífugo 3, 4 y 5; dando una reducción del 72,71% de Horas-Hombre en comparación con el plan actual para su ejecución por parte de la Gerencia de Mantenimiento.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados y conclusiones que se obtuvieron con el desarrollo de este trabajo de investigación y el cumplimiento de los objetivos se establecen las siguientes recomendaciones:

1. Garantizar la puesta en marcha y ejecución del Plan de Mantenimiento Preventivo propuesto para aumentar la disponibilidad de los equipos y asegurar la producción de gas natural del Distrito Furrial.
2. Cargar la estructura taxonómica propuesta en SAP PM para mantener el contexto operacional de la planta.
3. Orientar los esfuerzos a fin de mantener el contexto dentro de los límites operacionales y de existir la necesidad de rediseñarlos, actualizarlo bajo las normas existentes, aplicando la Norma de Manejo del Cambio IR-S-06.
4. Acelerar el arranque del Sistema de Aire de Instrumentos de las Miniplantas Compresoras para reducir la frecuencia de fallas.
5. Fomentar el compromiso de cada una de las organizaciones para definir estrategias a corto, mediano y largo plazo que permitan reducir de manera considerable los niveles de criticidad de los sistemas y sub-sistemas evaluados y por ende incrementar la confiabilidad operacional de la planta.

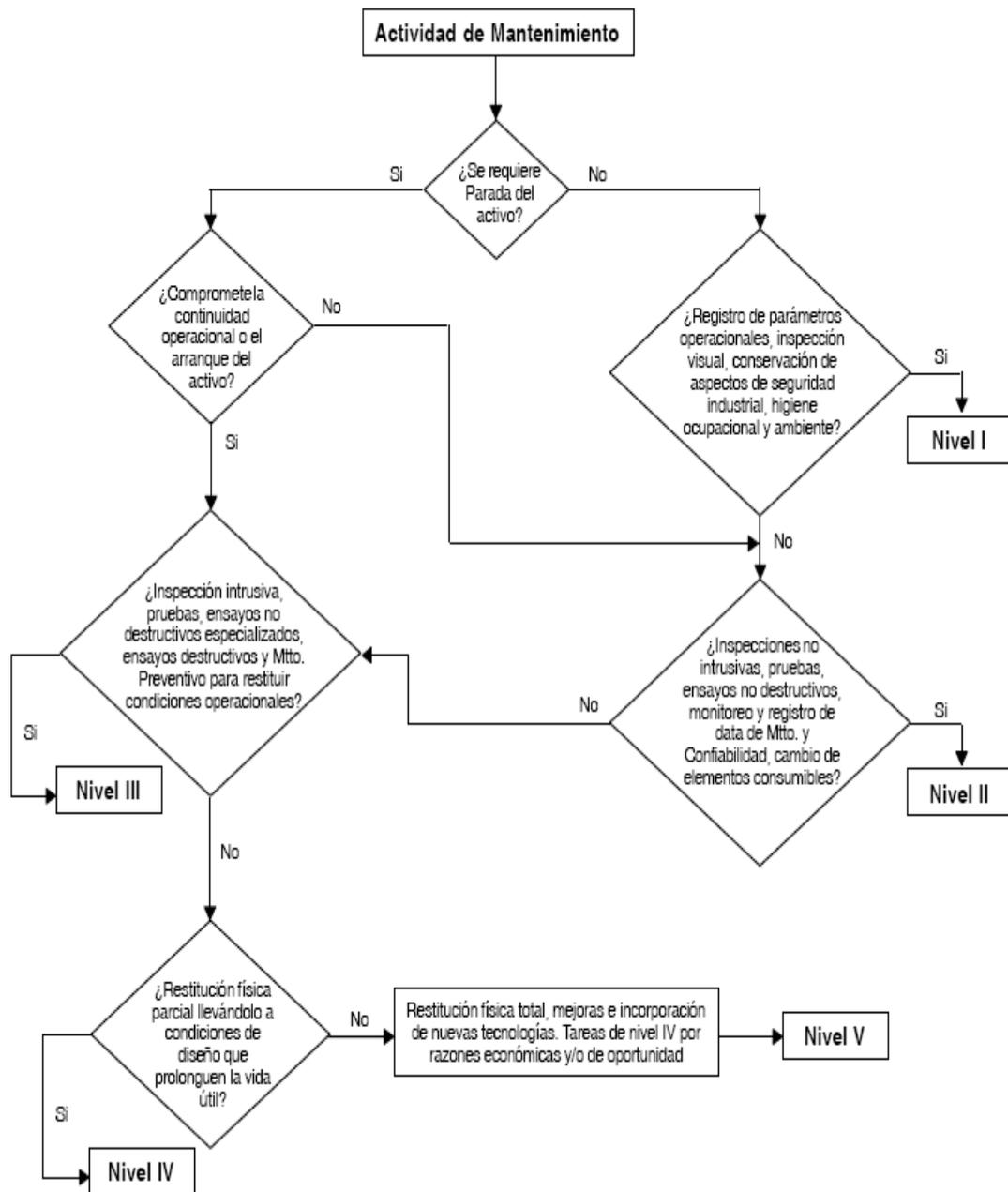
BIBLIOGRAFÍA

- ACEVEDO (2001). Introducción a la Metodología de Investigación en Ciencias Administrativas y del Comportamiento. México. Editorial Trillas.
- ARIAS, F. (2006). El proyecto de Investigación. “Introducción a la Metodología Científica”. Quinta Edición. Caracas – Venezuela. Editorial Episteme, C.A.
- BALESTRINI, M. (2006). Cómo se elabora el proyecto de investigación: “Para los estudios formulativos o exploratorios, descriptivos, diagnósticos, evaluativos, formulación de hipótesis causales, experimentales y los proyectos factibles”. Séptima Edición. Caracas – Venezuela: Consultores Asociados.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN). COVENIN 3049:1993 “Mantenimiento. Definiciones”.
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, N° 5.908 Extraordinario. Febrero de 2009. Imprenta Nacional.
- DANKHE, G. (1986). Diferentes diseños. Tipos de Investigación. Colombia. Editorial Mc-Graw Hill.
- HECTOR LOZADA. Planificación Estratégica. Diagrama Causa Efecto. [Documento en línea]. Disponible en: <http://goyoplan701.blogspot.com/2010/06/diagrama-causa-efecto-ishikawa.html>
- HURTADO DE BARRERA, J. (2000). Metodología de Investigación Holística. Tercera Edición. Caracas – Venezuela. Editorial SYPAL.
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen I. MM-01-01-01 Definiciones de Mantenimiento y Confiabilidad (2013).
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen I. MM-01-01-03 Tipos y Niveles de Mantenimiento (2013).
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen I. MM-01-01-07 Taxonomía de Activos para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (SGCM) (2011).

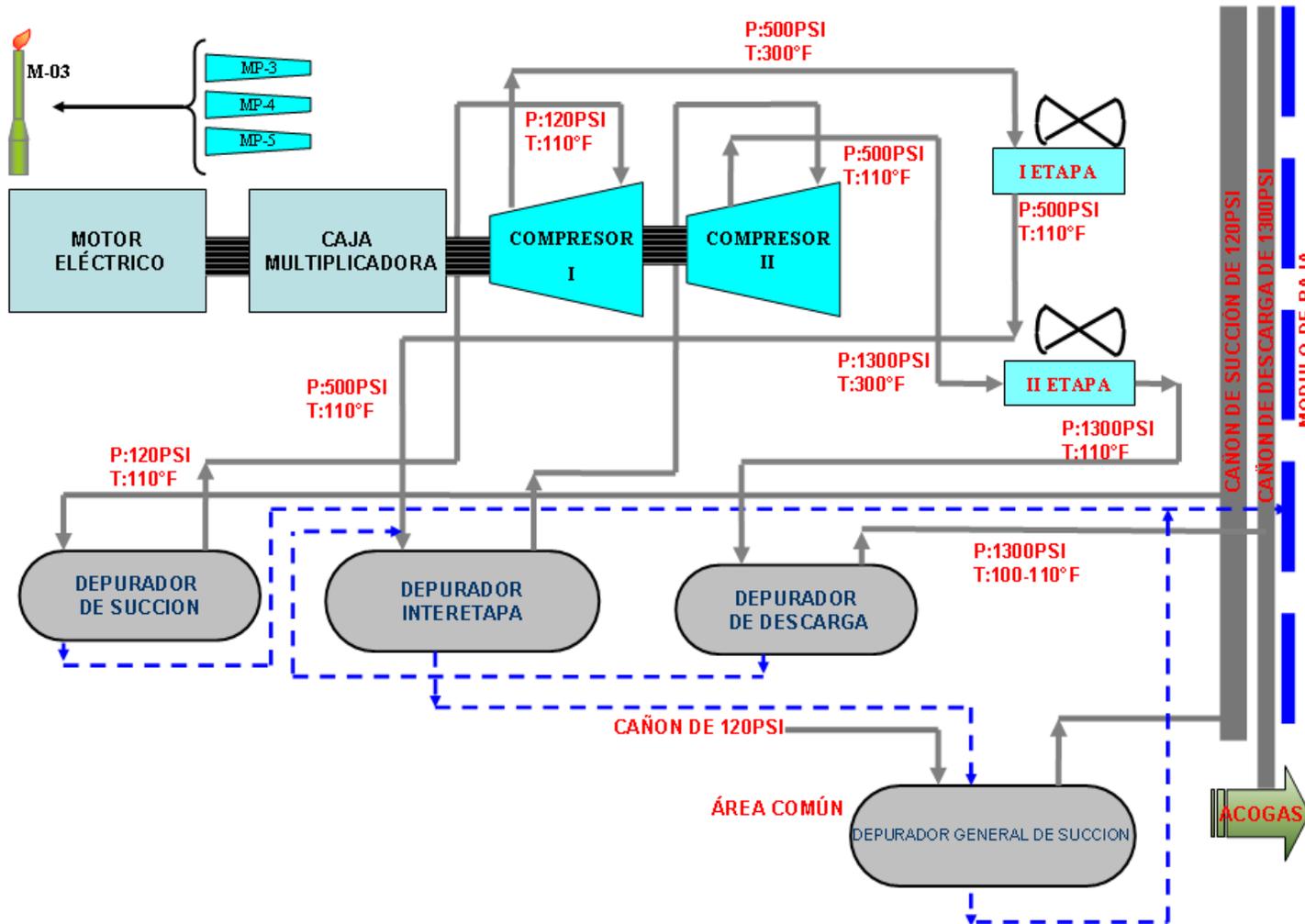
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen II. MM-02-01-00 Contexto Operacional para el Sistema de Gestión y Control de Mantenimiento (2012).
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen II. MM-02-01-01 Jerarquización de Activos por Análisis de Criticidad (2010).
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen II. MM-02-02-00 Análisis de la Función del Activo (2011).
- Manual de Mantenimiento de PDVSA. Volumen II. MM-02-02-01 Elaboración de Planes de Mantenimiento Preventivo (2013).
- Norma Internacional ISO 14224:2006. “Industrias de Petróleo, Petroquímica y Gas Natural - Recopilación e Intercambio de Datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos”.
- Petróleos de Venezuela. Acerca de PDVSA. [Documento en línea]. Disponible en:
http://www.pdvsa.com/index.php?tpl=interface.sp/design/readmenuprin c.tpl.html&newsid_temas=11
- *Society of Automotive Engineers (SAE)*. SAE JA1011 “Criterios de Evaluación de los Procesos de Mantenimiento Centrados en Confiabilidad”.
- *Society of Automotive Engineers (SAE)*. SAE JA1012 “Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)”.
- TAMAYO Y TAMAYO, M. (1990). El Proceso de la Investigación Científica. “Fundamentos de la Investigación”. Segunda Edición. México. Editorial Limusa, S.A.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL). (2005). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Primera Reimpresión. Caracas – Venezuela: Fedeupel.
- VILLAFRANCA (2002). Metodología de la Investigación. Bogotá-Colombia. Edit. McGraw Hill. Interamericana.

ANEXOS

Anexo 1. Flujograma para Clasificación de Tareas de Mantto. por Nivel



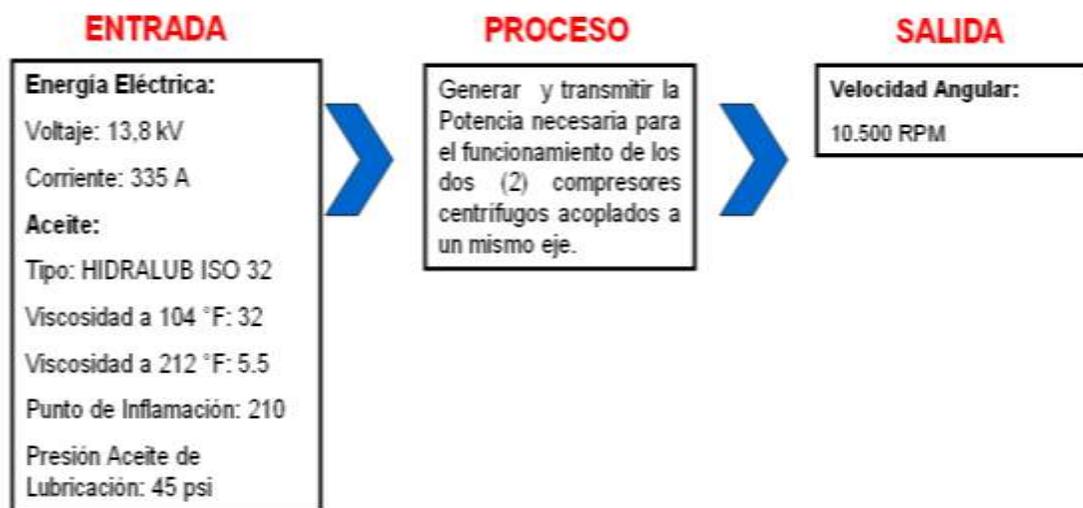
Anexo 2. Esquema del Proceso de Compresión de cada Miniplanta Compresora Jusepín



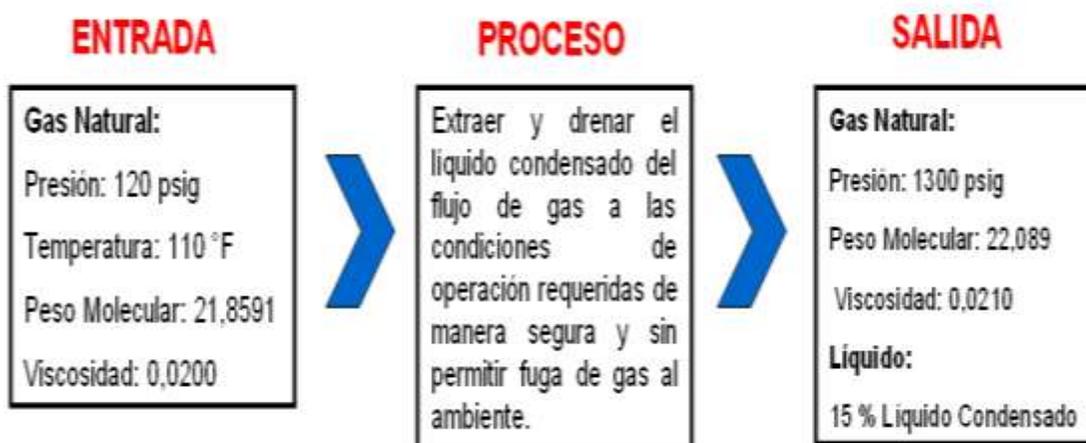
APÉNDICES

Apéndice 1. Diagramas EPS Sub-Sistema Generación de Potencia y Depuración

a) Sub-sistema de Generación de Potencia



b) Sub-Sistema de Depuración



Apéndices Contenidos en el CD:

- **Apéndice 2. (Contenido en el CD).** Estructura Taxonómica de las Miniplantas Compresoras Jusepín (MPCJ).
- **Apéndice 3.** Histórico de fallas y TPFs de las Miniplantas Compresoras Jusepín
- **Apéndice 4.** Clasificación de Fallas por Sistemas, Sub-Sistemas y Equipos.
- **Apéndice 5.** Frecuencia de Fallas y TPFs Simulados.
- **Apéndice 6.** Matriz de Cálculos de Criticidad.
- **Apéndice 7.** Plantillas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).
- **Apéndice 8.** Plan de Mantenimiento Propuesto.