

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



“ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DE UNA TURBINA A GAS”

Caso: Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA
UNIVERSIDAD DE ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

REALIZADO POR:
MANUEL DE JESÚS LÓPEZ ANUEL

Puerto La Cruz, Octubre de 2009.

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



“ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DE UNA TURBINA A GAS”

Caso: Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose.

ASESORES:

Prof. LINO CAMARGO
Asesor Académico

Ing. CARLOS BLANCA
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, Octubre de 2009.

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



“ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DE UNA TURBINA A GAS”

Caso: Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose.

El jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

EXCELENTE

Prof. Lino Camargo
Asesor Académico

Prof. Delia Villarroel
Jurado Principal

Prof. Edgar Rodríguez
Jurado Principal

Puerto La Cruz, Octubre de 2009.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajo de grado:

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

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por darme una segunda oportunidad de vida y por estar siempre a mi lado en todo momento y por darme la fuerza espiritual, la paz y la esperanza recibida para lograr con humildad el logro de esta meta añorada.

A mis padres Aralis Anuel y Manuel López, por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A mis hermanos Marielis López, Juan M. López, Leonardo López y Henry Jesús López que se que desde el cielo me sigue cuidando como un ángel desde la hora de su partida.

A mis abuelas, Rosa López y Mercedes Hernández y a mi Abuelo Modesto López que desde el cielo se siente orgulloso por mi logro alcanzado.

A mi querido y adorado hermano-compinche del alma Ronald Bravo que desde el momento que llego a mi vida ha sido un apoyo incondicional para mí.

A los que han tocado mi vida, y siempre formarán parte de mi ser.

Manuel de J. López A.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y ayudarme a cristalizar mis sueños.

A mis padres por su esfuerzo, amor y dedicación en todo momento y en todos los ámbitos de mi vida.

A la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, por infundar en mí los conocimientos necesarios y brindarme la oportunidad de cursar satisfactoriamente mis estudios.

Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose: primeramente al señor Carlos Blanca por confiar en este proyecto y brindarme siempre su valiosa ayuda, Jesús Mota, Carlos Valerio, Careli Luna, Neida Parra, Manuel García, Freddy Velásquez, El turco, Francisco Araujo, Carlos Rodríguez, Vidal, Sevilla, Abrahán Farias y Ricardo Pirella.

Al profesor Lino Camargo, por confiar en mí y brindarme su apoyo.

A mi amiga y colega Adriana Ríos, sin tu guía, sabiduría y apoyo hubiese sido difícil finalizar este proyecto

A mis primos que son como mis hermanos en especial a: Deynis Martínez, Rosilett Malave, Merymar Guerrero, Fannyrelis Guerrero, Fabiola Malave, Lizzeta Villarroel, Daniel Martínez, Oscar M. Castro, Arnoldo Rodríguez y mi nueva y querida prima Carla Murguey que es como parte de mi familia.

A mis tías que son como segundas madres para mí, en especial a: Deysi López, Fanny Anuel, Yamaira López, Obdalia Anuel y Rosa López.

A Los Profesores del departamento de mecánica, en especial: Delia Villarroel, Rómulo Nottaro, Simón Bittar, Orlando Ayala, Edgar Rodríguez, Jesús Moreno, Melchor Ledezma, Antonio Franco, Darwin Bravo y Diógenes Suárez.

A mis compañeros de mecánica: Roselis Machado, Patricia Santos, Rosanny Mongua, Isbeth Caldera, Yanetzy Figuera, Niurka Peinado, Lissetti García, Ericka Pulido, Numan Perales, Daniela Bauza, Carlos Horta, Patricia Rodríguez, Juan Carlos López, Alfrevir Planez, Alejandra Chersia, Osmel Arevalo, Williams Acosta, Giovanella Ríos, Alonso Ojeda, Ileana Yaguaramay, Karlina Ramos, Andreina Barrios, José Ángel Vera, Fredhangela Figueroa, Ana Matute, Rafa, Ali Zambrano, Luis Daniel Peraza, Lourdes Mimo, Alejandra Aguilera, Anaira Rivas, Jose Natera, Rubén Yepez, Luis Miguel Hernandez, Andre López, Diana Calderón, Rodolfo Silvagni, Juan Carlos Zerpa y todos aquellos que de alguna u otra forma estuvieron involucrados en mi proceso.

A mi querida y mejor amiga Andreina Palomo espero seguir contando contigo por el resto de mi vida.

A mis amigos: Ronald Bravo, Brillina Camacho, Jorge Luis Cabrera, Edson Sammy, Edyuvis Solano, Aurismel Saud, Luis Sandoval, Laura Estefanía, Ana Gabriela, Vanessa Cumana, Josmayra Fermín, Leobaldo Ron, Antonio López, Vanessa Finno, Maria Alejandra Rodríguez, Vanessa Luces, Maria Zurita, Eulennys Moreno, Fabiana Martinez, Robimar Rodríguez, Carlilegt Rodríguez, Kristel Colls, Alexandra Román, Ariana Delgado, Katherine Areinamo, Mariana Rivas, Oryza Ayala, Guasipati, Mafer Perez, Eureka Sambrano, a todos ustedes por haber estado y estar siempre en los momentos difíciles y felices de mi vida.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el desarrollo del Análisis Causa Raíz a la turbina a gas marca Nuovo Pignone, modelo PGT5 del Turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose, con el fin de encontrar las raíces físicas, humanas y latentes que indujeron a la falla crítica. Para el logro de este objetivo se describió el contexto operacional del equipo para diagnosticar los parámetros de funcionamiento y de diseño de la turbina a gas. Seguidamente se realizó un Análisis de Criticidad para identificar los modos de falla más críticos que tienen lugar en el equipo; se procedió a realizar el Análisis Causa Raíz propiamente dicho, estructurado por un árbol lógico de fallas basado en la información obtenida de entrevistas no estructuradas al personal operativo; las hipótesis obtenidas fueron validadas mediante una exhaustiva investigación que incluyó la revisión de registros de fallas y la realización de una prueba no destructiva de materiales (PMI), deduciéndose como raíz física de la falla crítica, a la desviación en la selección del material constituyente del tornillo de cierre de la pieza de transición del eje de alta presión de la turbina, derivándose de este hecho las acciones pertinentes para minimizar la ocurrencia de dicho evento.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	xiii
NOMENCLATURA.....	xvi
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA.....	21
1.1. Complejo Criogénico de Oriente	21
1.1.1. Reseña histórica.....	21
1.1.2. Ubicación geográfica.....	22
1.1.3. Misión, visión y política de calidad de la empresa.....	23
1.2. Planteamiento del problema	24
1.3. Objetivos de la investigación.....	25
1.3.1. Objetivo general	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	25
1.4. Justificación de la investigación	26
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	27
2.1. Antecedentes de la investigación.....	27
2.2. Fundamentos teóricos	29
2.2.1. Turbomáquinas	29
2.2.2. Turbina a gas	30
2.2.3. Ciclo Brayton.....	32
2.2.4. Potencia ISO	35
2.2.5. Niveles de mantenimiento de las Turbinas a gas.....	36
2.2.6. Componentes principales de una Turbina a gas PGT5.....	38

2.2.7. Falla	46
2.2.8. Contexto operacional	48
2.2.9. Criticidad de equipos	49
2.2.10. Análisis de Criticidad (AC)	49
2.2.11. Análisis Causa Raíz (ACR)	50
2.2.12. Proceso de Diagnóstico	53
2.2.13. Ponderación de factores	55
2.2.14. Mantenimiento	55
2.2.15. Seguridad Industrial, Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO)	58
2.2.16. Identificación Positiva de Materiales (PMI)	58
2.2.17. Superaleaciones	60
2.2.18. Nimonic 75	61
2.2.19. Aceros Inoxidables Martensíticos	62
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	64
3.1. Tipo de investigación	64
3.1.1. Según la estrategia	64
3.1.2. Según su propósito	65
3.1.3. Según el nivel de conocimiento	65
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA EN ESTUDIO	65
3.3. Técnicas para recopilación de información	66
3.4. Técnicas para el procesamiento de datos	67
3.5. Etapas de la investigación	68
3.5.1. Revisión bibliográfica	68

3.5.2. Descripción del contexto operacional de la turbina a gas PGT5	68
3.5.3. Análisis de criticidad a la turbina a gas PGT5.....	68
3.5.4. Identificación de las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas más críticas de la turbina a gas PGT5	72
3.5.5. Proposición de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas	73
3.5.6. Redacción del trabajo de grado	74
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	75
4.1. Descripción del contexto operacional de la turbina a gas PGT5.....	75
4.2. Aplicación del análisis de criticidad a la turbina a gas PGT5	78
4.2.1. Impacto operacional	78
4.2.2. Impacto en seguridad.....	83
4.2.3. Impacto ambiental	83
4.3. Identificación de las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas críticas de la turbina a gas PGT5.....	88
4.3.1. Problema.....	88
4.3.2. Modos de falla	88
4.3.3. Hipótesis y su validación.....	88
4.3.4. Causa raíz física.....	92
4.3.5. Causa raíz humana.....	95
4.3.6. Causas raíces latentes	95
4.4. Proposición de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5	96

CONCLUSIONES..... 100
RECOMENDACIONES..... 102
BIBLIOGRAFÍA..... 103

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Composiciones típicas de las Superafecciones.	61
Tabla 2.2. Propiedades de la superafección NIMONIC 75.....	62
Tabla 2.3. Tipos de Aceros inoxidable Martensíticos.	63
Tabla 4.1. Información técnica de la turbina en estudio.	77
Tabla 4.2. Valores actuales de la turbina en estudio.	77
Tabla 4.3. TPFS correspondiente a las fallas presentadas por la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.	79
Tabla 4.4. Intervalo de clase de los parámetros de evaluación del impacto a nivel operacional de las fallas presentadas por la turbina a gas PGT5, año 2007.....	80
Tabla 4.5. Ponderación designada a la falla según el impacto que ocasionan a nivel operacional por el TPFS en la turbina a gas PGT5.	81
Tabla 4.6. Ponderación designada a las fallas según el impacto a nivel operacional ocasionado por el número de fallas en la turbina a gas PGT5.	81
Tabla 4.7. Ponderación designada a la falla según el impacto que ocasionan a nivel operacional en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.....	82
Tabla 4.8. Ponderación atribuida a las fallas según el impacto que generan a nivel de seguridad en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.....	84
Tabla 4.9. Ponderación atribuida a las fallas según el impacto que generan a nivel ambiental en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.....	84
Tabla 4.10. Ponderación de cada falla con respecto al impacto global de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.....	85
Tabla 4.11. Identificación de nivel de criticidad a partir del impacto global que generan las fallas de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.....	86

Tabla 4.12. Nivel de Criticidad de las fallas de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007	86
Tabla 4.13. Composición química de la muestra A según la Identificación Positiva de Materiales (PMI).	93
Tabla 4.14. Composición química de la muestra B según la Identificación Positiva de Materiales (PMI)	94
Tabla 4.15. Acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5	97
Tabla 4.16. Continuación de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5	98

Lista de Figuras

Figura 1.1. Ubicación Geográfica del Complejo Criogénico de Oriente.	23
Figura 2.1. Turbina a gas.	31
Figura 2.2. Ciclo Brayton o ciclo de presión constante.	32
Figura 2.3. Diagramas P-V y T-S para un ciclo ideal.	33
Figura 2.4. Turbina de eje Simple.	34
Figura 2.5. Turbina de eje Doble.	35
Figura 2.6. Niveles de mantenimiento.	38
Figura 2.7. Compresor axial.	39
Figura 2.8. Camara de Combustión.	40
Figura 2.9. Inyector de gas Combustible.	41
Figura 2.10. Cesto Combustor de una Turbina a gas PGT5.	42
Figura 2.11. Esquema de la entrada de aire al Cesto Combustor.	42
Figura 2.12. Pieza de transición de una turbina a gas PGT5.	43
Figura 2.13. Toberas de una turbina a gas PGT5.	44
Figura 2.14. Eje o Rotor de alta presión de una turbina a gas PGT5.	45
Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)	45

Figura 2.15. Eje o Rotor de baja presión de una turbina a gas PGT5.	45
Figura 2.16. Árbol lógico de fallas para un ACR.	52
Figura 2.17. Analizador Portátil para reconocer aleaciones mediante PMI.....	60
Figura 2.18. Composiciones típicas de las Superaleaciones.	61
Figura 2.19. Propiedades de la superaleación NIMONIC 75.	62
Figura 2.20. Tipos de Aceros inoxidable Martensíticos.....	63
Figura 4.1. Turbina a gas PGT5 perteneciente al turbocompresor D4-81001.	76
Figura 4.2. Álabes rotos pertenecientes a la turbina a gas PGT5.....	90
Figura 4.3. Árbol lógico de fallas.....	91
Figura 4.4. Tornillo de cierre de la pieza de transición de la Turbina PGT5.	92
Figura 4.5. Muestra A Tornillo color plateado (PART NUMBERT: RVR20649).....	93
Figura 4.6. Muestra B Tornillo color negro (PART NUMBERT RVU22079).	94

NOMENCLATURA

%	Porcentaje
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
AC	Análisis de Criticidad
ACCRO	Ampliación del Complejo Criogénico de Oriente
ACR	Análisis Causa Raíz
ANSYS	Swanson Analysis Systems,
BD	Barriles Diarios
CADAFE	Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico
Cr	Cromo
Ec.	Ecuación
F_{CN}	Factores de corrección
Fe	Hierro
FEM	Técnicas de elementos finitos
Fig.	Figura
GCV	Válvula de Control de Gas
HMI	Human Machine Interface
Hp	Caballos de Fuerza
HP	Alta Presión
hrs	horas
I	Intervalo de Clase
IGV	Inlet Gas Vane
In	Pulgadas
ISO	International Estandár Organization
KV	Kilovoltio
LGN	Líquidos del Gas Natural
LP	Baja Presión
LVDT	Transformador Diferencial de Variación Lineal
MCC	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
MmHG	Milímetros de mercurio
Mo	Molibdeno
MPa	Mega Pascal
N	Número de Clases
Ni	Níquel

P	Presión
PCD	Velocidad Compresor Axial
PDVSA	Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima
P_I	Potencia ISO
PMI	Identificación Positiva de Materiales
P_N	Potencia neta corregida
Psia	Libra por Pulgada Cuadrada
Rpm	Revoluciones por Minuto
s	Segundos
S	Entropía
SAO	Sistemas de Administración y Procesamiento de Datos
SIAHO	Seguridad Industrial, Ambiente e Higiene Ocupacional
SRV	Speed Ratio Valve
TFS	Tiempo Fuera de Servicio
Ti	Titanio
T	Temperatura
TPFS	Tiempo Promedio Fuera de Servicio
V	Volumen
Va	Valor más alto
Vb	Valor más bajo

INTRODUCCIÓN

Las turbinas a gas son equipos de gran importancia dentro de la industria petrolera y del gas. Las mismas se encargan de entregar la potencia necesaria para accionar generadores, bombas y compresores; los cuales son utilizados en la generación de la energía eléctrica, requerida para el funcionamiento de las plantas de procesamiento, y el mantenimiento de los flujos de producción, con la finalidad de obtener productos finales que producen riqueza a la nación.

En el país existen gran cantidad de plantas petroleras y de gas, que poseen turbinas de diferentes fabricantes y modelos, tal es el caso de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose que como industria primordial en la economía venezolana busca mantener en estado óptimo sus instalaciones y procesos productivos, por tal motivo se encuentra a la disposición de asumir los cambios de acuerdo a las necesidades de seguridad, higiene y ambiente a las cuales se enfrenta. La gerencia de turbomáquinas cuenta con un personal capacitado en el área de mantenimiento y con un historial de registro de fallas de los equipos que posee. Actualmente la organización ha implementado las políticas de mantenimiento con el fin de preservar los activos participantes en los sistemas de producción, disminuyendo el riesgo de falla de los equipos, lo que redundará en seguridad tanto para las instalaciones, el ambiente y los recursos humanos inherentes al proceso operacional.

El mantenimiento contribuye ampliamente en la disminución del riesgo de fallas en sistemas industriales, al mejorar la condición de los distintos componentes bajo frecuencias de intervención definidas. Estas pueden ser recomendadas por el fabricante, custodios de los equipos, o por la experiencia de profesionales en el ramo.

La aplicación específica de este trabajo se enfoca en la identificación de las raíces físicas, humanas y latentes que indujeron a una falla real en una turbina a gas. Como punto de partida fue necesario el conocimiento del principio de funcionamiento del equipo, a manera de identificar las variables y parámetros operacionales del mismo. Luego la determinación de las fallas críticas, para conocer el impacto que generan a nivel operacional, de seguridad y ambiental, para así identificar la raíz física, humana y latente de la falla más crítica mediante la elaboración de un árbol lógico de fallas. Estas técnicas ayudaron a la creación y proposición de un conjunto de acciones y estrategias que garantizarán el incremento de la efectividad de la máquina.

El presente trabajo de investigación consta de cinco (5) capítulos, los cuales se estructuraron de la siguiente manera:

Capítulo I: Se presenta la identificación de la empresa, el planteamiento del problema, objetivo general y objetivos específicos, con la finalidad de cumplir de forma sistemática con el desarrollo del trabajo y la justificación del mismo.

Capítulo II: Contempla los fundamentos teóricos inherentes a la investigación, constituidos por el basamento que justifica la selección de las variables de campo consideradas para el estudio; entre estos, los antecedentes de la investigación y las bases teóricas.

Capítulo III: Se describe el marco metodológico de la investigación, donde se incluye el tipo de investigación, técnicas de investigación y la descripción de la metodología utilizada para llevar a cabo el proyecto.

Capítulo IV: Constituye el desarrollo del trabajo y análisis para la identificación de la causa raíz de la falla crítica real presentada por la turbina.

Capítulo V: Se presentan las conclusiones y recomendaciones logradas a través del desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Complejo Criogénico de Oriente

1.1.1. Reseña histórica

El 22 de Noviembre de 1985 fue inaugurado el Complejo Criogénico de Oriente, con el objetivo de extraer del gas natural los productos líquidos de mayor valor comercial y acondicionarlos para consumo del mercado interno, suministrar insumos a la industria petroquímica y colocar productos derivados en el mercado internacional. El nacimiento de este complejo permite obtener mejor provecho a este recurso energético de tanto valor y utilidad como el petróleo.

Inicialmente el Complejo constaba de una planta de extracción de líquidos del gas natural (LGN) en San Joaquín y una planta de Fraccionamiento en Jose con una capacidad de 57 mil barriles diarios (57 MBD) de líquidos del gas natural, pero las crecientes demandas en los mercados nacionales e internacionales determinaron su ampliación (proyecto ACCRO). Este proyecto se llevó a cabo en varias etapas comenzando en 1992. Con la ejecución de las primeras etapas, el Complejo Criogénico de Oriente se constituye en tres plantas de Extracción y una planta de Fraccionamiento Almacenaje y Despacho, con una capacidad instalada de fraccionamiento de 150 MBD de LGN. Adicionalmente en 1998 PDVSA Gas dió en concesión al Consorcio Enro-Accro-Tecnoconsult, etapas III y IV del proyecto ACCRO bajo la modalidad de diseño, construcción, propiedad, operación y mantenimiento, incrementando la producción en 50 MBD de LGN para un total de

200 MBD, convirtiéndose actualmente en el Complejo gasífero más grande de Latinoamérica.

1.1.2. Ubicación geográfica

El Complejo Criogénico de Oriente está ubicado en los estados Anzoátegui y Monagas, está formado por tres plantas de extracción de gas natural, una de ellas está ubicada en San Joaquín a 12 Km. al oeste de la ciudad de Anaco, Estado Anzoátegui, la segunda localizada en Santa Bárbara a 65 Km. de la ciudad de Maturín, Estado Monagas y una planta que se encuentra en Jusepín, Estado Monagas, estas plantas procesan el gas natural produciendo LGN.

El Complejo Criogénico de Oriente también cuenta con una Planta de Fraccionamiento y Despacho, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui (Jose) en la Autopista Rómulo Betancourt entre las ciudades de Píritu y Barcelona, al norte del estado Anzoátegui, Ver Fig. 1.1. Su filosofía operacional consiste en recibir el LGN vía poliductos desde las plantas de extracción de San Joaquín, Santa Bárbara-Jusepín, fraccionarlos en: Propano, Normal Butano, Isobutano, Pentano, Gasolina y Nafta Residual, los almacena y los despacha al mercado Nacional e Internacional.



Figura 1.1. Ubicación Geográfica del Complejo Criogénico de Oriente.

Fuente: Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose. (2009)

1.1.3. Misión, visión y política de calidad de la empresa

Misión. Transportar, fraccionar, almacenar y despachar en forma segura, oportuna y confiable los Líquidos del Gas Natural (LGN), soportado por capital humano competente, dentro de un ambiente organizacional favorable en armonía con el medio ambiente, con tecnología actualizada, agregando el máximo valor al negocio de los Líquidos del Gas Natural (LGN)

Visión. Ser la Organización que valore el negocio de los Líquidos del Gas Natural (LGN), aplicando las mejores prácticas mundiales, en armonía con el ambiente, y contribuyendo con el desarrollo socioeconómico del país.

Política de la calidad. La Gerencia de Fraccionamiento y Despacho fundamenta su Política de la Calidad en el compromiso de fraccionar los Líquidos del Gas Natural, almacenarlos y despacharlos oportunamente con la calidad requerida por nuestros clientes y cumpliendo con las exigencias en materia de Seguridad, Higiene y

Ambiente de PDVSA, garantizando la eficacia del sistema de Calidad y la mejora continua de los procesos.

1.2. Planteamiento del problema

PDVSA es una de las empresas más importantes del país por su aporte económico y su proyección internacional, consta de una gran infraestructura organizada por funciones cuyo objetivo primordial es la explotación, manejo y comercialización del petróleo y sus derivados.

La Planta de fraccionamiento de gas se puede definir como un centro de operaciones que recibe el gas líquido de las plantas de extracción de San Joaquín, Santa Rosa, Santa Bárbara y Jusepín para fraccionarlo en diferentes productos como gasolina, propano, butano (normal e isobutano) y pentano. Dentro de su parte operativa se encuentran las siguientes zonas: tren A área 250, tren B área 260, tren C área de fraccionamiento 270 y el área de refrigeración 380.

El área 380 posee cinco turbocompresores en funcionamiento, accionados por turbinas marca Nuovo Pignone® modelo PGT5. Las turbinas se encargan de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el buen funcionamiento de la planta, a la vez que se encuentran constituidas por diferentes componentes considerados vitales, debido a que la falla de alguno de ellos genera una posible parada de la planta. Actualmente el turbocompresor D4-81001 ha presentado inconvenientes a nivel de la turbina por fallas de sus componentes, caracterizadas por altas temperaturas, vibraciones, corrosión, entre otros; ocasionando paradas imprevistas de dicho conjunto de equipos, lo que conlleva al incumplimiento de las labores programadas por la empresa, pérdidas de producción, altos costos y desperdicio de la vida útil de sus componentes.

Por estos motivos la empresa se ha encargado de proponer la realización del análisis causa raíz con el objeto de identificar las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas críticas de la turbina y así proponer acciones para disminuir la ocurrencia de las mismas en dicha máquina. Para poder obtener este resultado, se necesitó aplicar una metodología de análisis de criticidad, que permitió jerarquizar las fallas de mayor impacto a nivel operacional, ambiental y/o en seguridad. Posteriormente se realizó el árbol lógico de fallas, a través de un conjunto de hipótesis generadas por un equipo multidisciplinario de trabajo integrado por el personal de operaciones, gerencia técnica y la de mantenimiento mayor.

En consecuencia, el desarrollo de esta investigación permitió generar acciones factibles para mejorar la operatividad de la turbina objeto de estudio, con el fin de maximizar la rentabilidad del negocio gasífero y así cumplir con los planes estratégicos de PDVSA GAS.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Analizar la Causa Raíz de una turbina a gas marca Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose, PDVSA GAS.

1.3.2. Objetivos específicos

Describir el contexto operacional de la turbina a gas PGT5.

Aplicar el análisis de criticidad a la turbina a gas PGT5 para la identificación de la falla de mayor impacto a nivel operacional, ambiental y/o en seguridad.

Identificar las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas críticas de la turbina a gas PGT5.

Proponer acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5.

1.4. Justificación de la investigación

El estudio se justifica desde el punto de vista científico por sus aportaciones teóricas, metodológicas y prácticas. En lo teórico, porque el trabajo constituyó una oportunidad para emplear un conjunto importante de conceptos, teorías, experiencias e ideas que permitieron el conocimiento, aprehensión y consideración de soluciones factibles al problema investigado, en concordancia con las políticas, visión, misión y valores de la corporación.

En lo que respecta a la trascendencia metodológica de la investigación, se tiene que su desarrollo implicó la utilización de distintos métodos, normas, técnicas y procedimientos de los estudios de campo de tipo proyectivo, al haber estado centrado en la resolución de un problema de naturaleza práctica.

La utilidad práctica del trabajo se vislumbra en el momento que dicho producto podrá servir de base a la corporación para prever la toma de decisiones inherentes a la solución de los problemas detectados durante el transcurso del proceso investigativo. Las aplicaciones de las acciones propuestas garantizarán el buen funcionamiento del equipo lo cual favorecerá en la disminución de los costos y aumentara el nivel de producción.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo del estudio se elabora el marco teórico, en concordancia con los objetivos perseguidos, ya que se considera que la literatura revisada proporcionó los elementos teórico - epistémicos necesarios para el establecimiento del tema o problema objeto de investigación.

2.1. Antecedentes de la investigación

A continuación se presenta un breve resumen de las investigaciones realizadas en el área de estudio que sirvieron de base, ya sea por su contenido o metodología, para el desarrollo del trabajo de grado.

Cabello, M. (2006) realizó un trabajo de investigación que consistió en la identificación de los equipos más críticos de la planta de fraccionamiento catalítico de la Refinería Puerto la Cruz, por lo que fue necesario realizar un análisis de criticidad. Posteriormente y debido a que era necesario adoptar mejoras en el proceso de procura, de partes y repuestos de los equipos altamente críticos, se procedió a depurar y actualizar las listas de repuestos que se encontraban en el sistema SAO (Sistema de Administración y Procesamientos de Datos). Todas las metodologías utilizadas en este proyecto permitieron enfocar esfuerzos en la procura de partes y repuestos de los equipos más críticos, sin dejar a un lado los costos que se generan por la tendencia de inventarios; además de sensibilizar al personal de mantenimiento para que se realicen planes de mantenimiento con mayor frecuencia y de manera detallada a estos equipos [1].

González, M. (2004) llevó a cabo una investigación donde se realizó un análisis de fallas en el cordón de soldadura de las cintas de corte empleadas en las máquinas de sierra tipo horizontal. La investigación se concretó en la recopilación de información referente a las especificaciones técnicas, el modo de operación de la máquina de sierra y la cinta de corte, y la selección de la cinta especificada por los fabricantes; determinación de la frecuencia de fallas en el cordón de soldadura; estudio (mecánico, químico y metalúrgico) en la zona del cordón, interfase y cinta. Con el cumplimiento de cada una de éstas, se obtuvieron el material de la cinta y las causas de las fallas que ocasionaron la fractura en la cinta de sierra [2].

López, J. (2003) realizó un trabajo que se llevó a cabo mediante dos metodologías diferentes Análisis de Criticidad (AC), análisis de esfuerzos mediante simulación con ANSYS 5.4, basado en técnicas de elementos finitos (FEM) y Análisis Causa Raíz (ACR). Mediante la metodología de Análisis de Criticidad (AC), se logró recopilar y ordenar información que permitió definir el impacto económico y operativo de las fallas que conllevaron a reducir la cantidad de energía despachada en los meses de octubre y noviembre del año 2001 en CADAFE. El Análisis Causa Raíz (ACR), se realizó mediante la elaboración de un árbol de fallas y de la comprobación de hipótesis que fueron formuladas y verificadas mediante una investigación de las características microestructurales de las superaleaciones utilizadas para la fabricación de los álabes [3].

Jiménez C. y Carmona L. (2002) realizaron un trabajo donde se analizó el historial de funcionamiento de cada equipo rotativo de la planta de extracción San Joaquín PDVSA GAS, donde también se aplicaron los modelos matemáticos pertinentes para hallar los parámetros de mantenimiento, asociados al banco de datos disponibles. Mediante el MCC se determinaron cinco equipos críticos, los cuales se encontraban en diferentes etapas del proceso productivo, por ello se seleccionó la etapa crítica, es decir, la etapa donde se encontraban el mayor número de equipos,

para los cuales se diseñaron los programas de mantenimiento para mejorar su disponibilidad [4].

Ching, M. (2000) desarrolló un trabajo que muestra el estudio de los equipos motocompresores White superior modelo 825, mediante los indicadores básicos T.O., T.F.S., confiabilidad y tasa de fallas, como base para la construcción de las curvas de la bañera de dichos equipos, permitiendo la visualización del estado de los mismos en la actualidad y su posible comportamiento en el futuro. Se desarrolló el método de Análisis Causa Raíz (ACR) para definir e interpretar las causas que prolongan el tiempo de mortalidad infantil en los motocompresores, una vez que son sometidos a la ejecución del mantenimiento mayor, finalmente se realizó un análisis económico, costo-beneficio, definiendo las acciones que permitan mitigar las causas reflejadas en el ACR y los costos asociados a dichas causas [5].

Las investigaciones poseen cierta relación con este proyecto, ya que al igual que estos, se pretende encontrar las fallas más recurrentes que afectan a un equipo o máquina mediante ciertas metodologías, para así corregirlas y tratar de eliminar la causa raíz de las mismas, y así evitar su ocurrencia en el tiempo.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Turbomáquinas

Las turbomáquinas son una clase de máquinas de fluido. Por máquina de fluido se entiende el conjunto de dispositivos mecánicos que permite un intercambio de trabajo mecánico entre el exterior y el fluido que atraviesa la máquina (denominado fluido de trabajo). Como ejemplo, cabe mencionar el motor cohete, el motor de combustión interna, las bombas, las turbinas, entre otros.

En las turbomáquinas (del Latín turbare, “remolino”, “torbellino”) existe comunicación continua entre la entrada y la salida de fluido. En consecuencia forman parte de las denominadas máquinas de flujo. El intercambio de trabajo mecánico con el exterior se logra por medio de un eje al que va adosada una pieza de forma adecuada, denominada rotor. Esto hace que estas máquinas tengan en general una morfología con simetría de revolución. Ejemplos de turbomáquinas son las turbinas, los turbocompresores, las turbobombas, los turbogeneradores, entre otros. El intercambio de potencia con un eje exige que este gire y que transmita un par. No siempre ocurre, pero es muy frecuente la existencia de un estator o pieza no giratoria, cuya misión es deflectar la corriente. Sólo con la concurrencia del estator y rotor es posible una operación eficiente. Otra característica básica es la producción de una diferencia de presión entre entrada y salida [6].

2.2.2. Turbina a gas

Es una máquina de combustión interna, donde la energía contenida en los gases calientes es transformada en energía mecánica para mover algún equipo; ya sea una bomba, compresor o generador. Todo dispositivo que genera potencia opera bajo ciclos, una turbina a gas funciona bajo el ciclo Brayton o ciclo a presión constante. Una turbina a gas en esquema general puede mostrarse en la Fig. 2.1.

Las turbinas a gas pueden clasificarse de la siguiente manera:

Según su filosofía de diseño:

- Aeroderivativas. Este modelo de turbina proviene de la adecuación de las turbinas utilizadas en la aviación y presenta las siguientes características:
 - Son de dimensiones pequeñas.
 - Las piezas son enfriadas por aire.

- Materiales livianos
- Su mantenimiento no es en sitio, se realiza en talleres externos.
- Posee mayor eficiencia.
- Industriales. Estas turbinas fueron diseñadas para desarrollos industriales y sus características son las siguientes:
 - Los materiales utilizados son robustos.
 - Son de gran tamaño.
 - El mantenimiento se realiza en sitio.
 - El tiempo entre mantenimiento es mayor a la aeroderivativas.

Según el número de ejes:

- Simple. Generalmente se utiliza para cargas a una sola velocidad (generadores).
- Doble o multieje. Para cargas a varias velocidades (Bombas y compresores) [7].

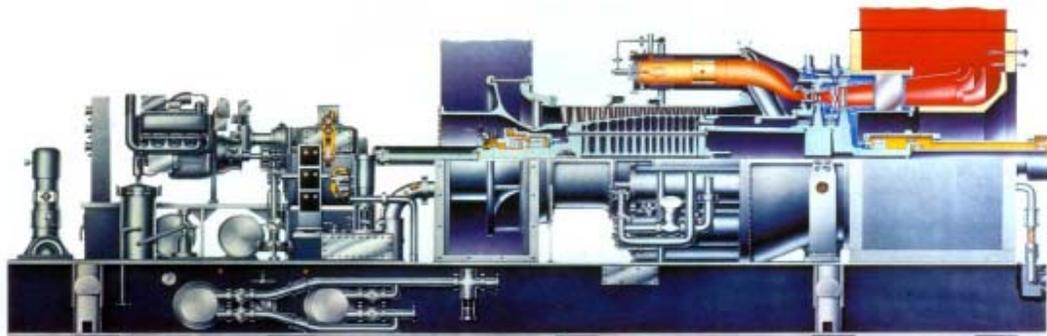


Figura 2.1. Turbina a gas.

Fuente: Manual Nuovo Pignone. (2004)

2.2.3. Ciclo Brayton

Todo dispositivo que genera potencia opera bajo ciclos, una turbina a gas funciona bajo el ciclo Brayton o ciclo a presión constante. Para facilitar el estudio del ciclo Brayton se eliminan algunas situaciones reales como son:

- Caídas de presión. Se considera que no existe fricción, por lo que el fluido mantiene su presión mientras fluye de un sitio a otro.
- Pérdidas de calor. Se consideran todos los equipos aislados y no existe intercambio de calor con el ambiente.
- Los procesos de compresión y expansión son isentrópicos.

Estas consideraciones hacen que exista una diferencia moderada entre el ciclo real y el ciclo ideal, pero permite un análisis eficaz de los procesos que ocurren. Los diagramas de propiedades Temperatura vs. Entropía (T-S) y Presión vs. Volumen (P-V), han sido de gran ayuda para el estudio de los ciclos. En la Fig. 2.2. se observa un ejemplo del ciclo Brayton en un diagrama T-S y muestra las diferencias entre el ciclo ideal y el ciclo real.

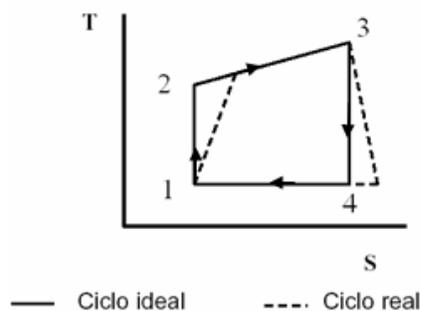


Figura 2.2. Ciclo Brayton o ciclo de presión constante.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

En los diagramas T-S y P-V, el área encerrada dentro de las curvas de los procesos representa el trabajo neto producido durante el ciclo y es equivalente al calor neto producido en ese ciclo. Ver Fig. 2.3.

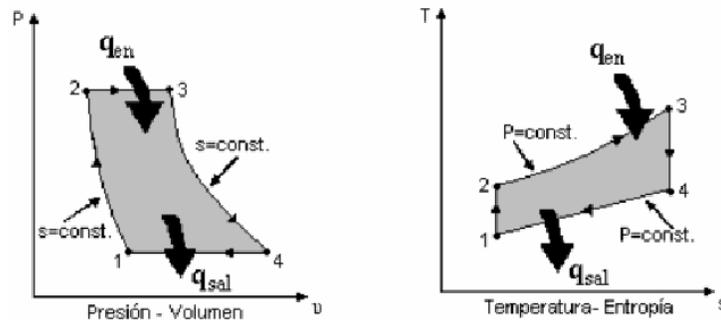


Figura 2.3. Diagramas P-V y T-S para un ciclo ideal.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

La Fig. 2.3 representa el comportamiento ideal de los gases dentro de la turbina. En el punto 1 el aire es tomado a presión y temperatura atmosférica y es comprimido hasta el punto 2; este proceso es considerado isentrópico y el aire disminuye su volumen debido a la compresión. Luego se produce un aumento de volumen a presión constante desde el punto 2 al punto 3 (proceso de combustión), desde el punto 3 al punto 4 los gases son expandidos, mediante un proceso isentrópico, para luego ser descargados a la atmósfera punto 1.

A continuación se muestra un esquema del ciclo Brayton, en su modalidad de ciclo abierto, para una turbina de eje simple:

La turbina a gas que se muestra en la Fig. 2.4 está compuesta por un compresor, una cámara de combustión, rueda de turbina y un eje; que está unido directamente a la carga. En esta configuración todos los componentes giran a la misma velocidad y

es utilizada en generación eléctrica, ya que se debe mantener una frecuencia constante (60 HZ) que depende directamente de la velocidad.

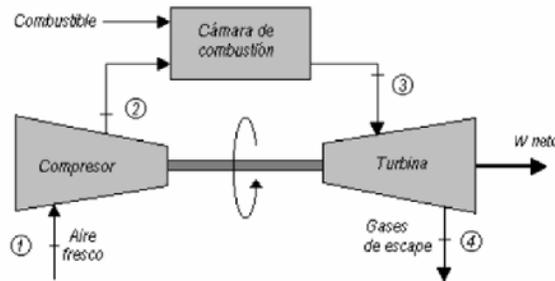


Figura 2.4. Turbina de eje Simple.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

Hay otra configuración donde existen dos ejes, que giran independientemente y es conocido como turbina a gas de eje doble, el primer eje es llamado eje de baja presión (Low Pressure, LP) y entrega la potencia necesaria para mover el compresor que eleva la presión del aire requerida para la combustión, este eje se mantiene a una velocidad constante durante el funcionamiento de la turbina. El segundo eje es llamado eje de alta presión (High Pressure, HP) y es el que transmite la potencia a la carga, esta configuración es utilizada para mover equipos que requieren variar su velocidad dependiendo los requerimientos del proceso en donde se encuentren. La Fig. 2.5. representa una turbina de eje doble.

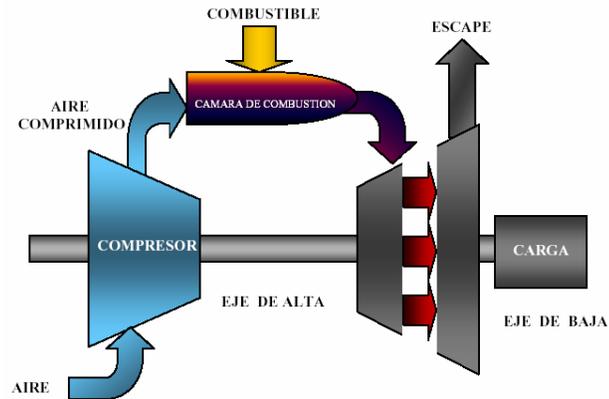


Figura 2.5. Turbina de eje Doble.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

Cada fabricante tiene su propio diseño y configuración de turbina con la finalidad de mejorar la eficiencia del ciclo, Los dos esquemas anteriores son de ciclo abierto, pero existen otros como son:

- Ciclo cerrado: Los gases de combustión son reciclados y reutilizados continuamente.
- Ciclo regenerativo: Los gases de escape se utilizan para calentar el aire antes de entrar a la cámara de combustión
- Ciclo con regeneración: Los gases de escape son utilizados para calentar otro sistema.

2.2.4. Potencia ISO

La potencia ISO (Internacional Estándar Organization) es la potencia neta de salida de la turbina, bajo condiciones específicas de trabajo, las cuales son:

- Temperatura ambiente: 15 °C
- Presión atmosférica: 750 mmHG
- Humedad relativa: 60 %

Para realizar una buena selección, es importante conocer la potencia neta de salida, en el lugar donde estará funcionando la turbina, para ello se deben conocer las condiciones de temperatura ambiente, altura sobre el nivel del mar, humedad relativa, caídas de presión en ductos y los factores de corrección del fabricante. Entonces la potencia neta corregida para el lugar de trabajo, estará dada por:

$$P_N : P_1 \times f_{c1} \times f_{c2} \times \dots \times f_{cN} \quad (2.1)$$

Donde,

P_N : Potencia neta corregida.

P_1 : Potencia ISO.

F_{CN} : Factores de corrección que se requieren para calcular con mayor exactitud la potencia neta.

En otros casos el fabricante suministra ciertas tablas, donde se introducen los datos para obtener la potencia corregida

2.2.5. Niveles de mantenimiento de las Turbinas a gas

Cada uno de los componentes de una turbina están en continuo funcionamiento, sometidos a fatigas mecánicas y térmicas, por tal motivo el fabricante recomienda el reemplazo de cada una de ellos al tener ciertas horas de funcionamiento. Para ello se tienen diferentes niveles de mantenimiento, los cuales son denominados así:

Zona de combustión. Se conoce como Nivel I de mantenimiento, se realiza cada 8000 hrs. En este nivel de mantenimiento se inspecciona y se reemplazan componentes de la cámara de combustión, pieza de transición y toberas.

Pasos Calientes. Se conoce como nivel II de mantenimiento, se realiza cada 20000 hrs. En este nivel de mantenimiento se inspeccionan y se reemplazan componentes de la cámara de combustión, pieza de transición, toberas y se realiza inspección de las ruedas de la turbina.

Mayor. Se conoce como Nivel III de mantenimiento, se realiza cada 40000 hrs. En este nivel de mantenimiento se inspeccionan y reemplazan componentes de la cámara de combustión, pieza de transición, toberas, ruedas de turbina, compresor axial, ejes, cojinetes y plenum de escape.

Los tres niveles antes mencionados, se cumplen para la mayoría de los modelos de turbinas existentes, no así, las horas de funcionamiento recomendadas para realizarlo, lo cual, dependen de cada fabricante.

En las turbinas PGT5 existe un último tipo de mantenimiento donde se reemplazan: carcasas, eje de alta y eje de baja presión, este tipo de mantenimiento fue denominado Mayor de mayores.

En la Fig. 2.6. se hace un resumen de los tipos de mantenimiento y las horas de funcionamiento requeridas para su realización.

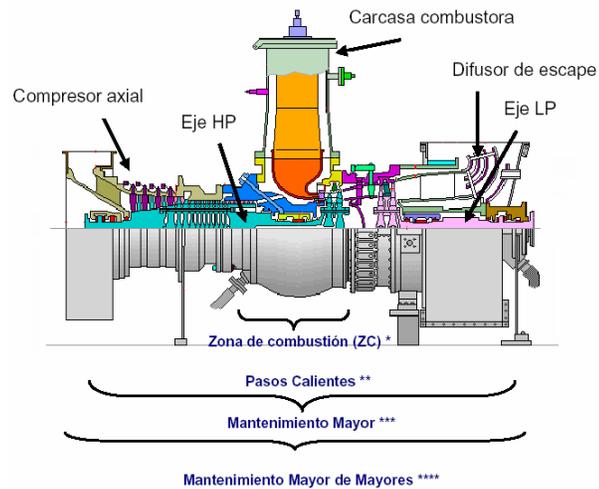


Figura 2.6. Niveles de mantenimiento.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6. Componentes principales de una Turbina a gas PGT5

2.2.6.1. Compresor axial

Tiene como función elevar la presión del aire que entra a la turbina y esta compuesto por los álabes estatóricos, álabes rotóricos y carcazas. Los álabes estatóricos están asegurados en una carcasa y no giran, los álabes rotóricos están en el eje y tienen una velocidad de giro. Un juego de álabes rotóricos y estatóricos conforman una etapa de compresión.

En la Turbina a gas PGT5 son 15 etapas de compresión.

En la Fig. N° 2.7. se muestra el compresor axial y las diferentes partes en que se encuentra conformado.

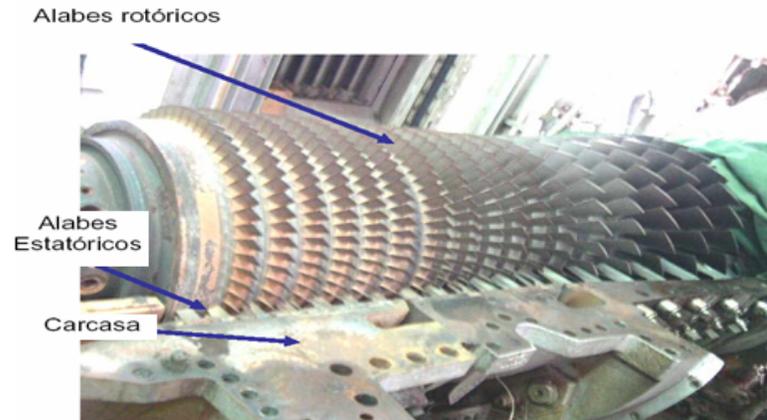


Figura 2.7. Compresor axial.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.1.1. IGV

Los IGV (Inlet Gas Vane) son álabes estatóricos que se encuentran en las primeras etapas del compresor axial, tienen como principal función disminuir la turbulencia a la entrada del compresor axial. En las unidades PGT5 existe una etapa de IGV.

2.2.6.2. Cámara de Combustión

Es el lugar donde se produce la combustión en la turbina y en ella se generan los gases calientes, los cuales contienen la energía que será transformada en energía mecánica. Se encuentra compuesta por:

- Carcaza Combustora.
- Bujía (Spark Plug).
- Detector de llamas.
- Inyector de gas.
- Cesto Combustor.

En la Fig. 2.8. se muestra la cámara de combustión y las diferentes partes que la conforman.

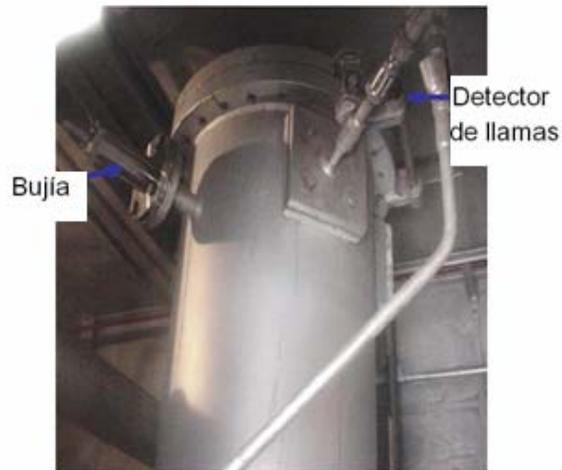


Figura 2.8. Cámara de Combustión.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.2.1. Bujía

Produce la chispa necesaria para iniciar la combustión de la mezcla de aire y gas, genera un arco eléctrico de 15000 KV. Ver Fig. 2.8.

2.2.6.2.2. Detector de llamas

Da confirmación para el inicio del proceso de combustión al sistema de control de la máquina. Ver Fig. 2.8.

2.2.6.2.3. Inyector de gas combustible

Tiene como función distribuir uniformemente el gas dentro del cesto para que el proceso de combustión sea homogéneo en todas las áreas.

En la Fig. 2.9. se muestra el inyector de gas combustible de una turbina a gas PGT5.



Figura 2.9. Inyector de gas Combustible.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.2.4. Cesto Combustor

En el se mezclan el gas combustible y el aire para dar paso al proceso de combustión. El diseño final de este componente es el producto de muchas evaluaciones, entre ella: movimiento, reacciones químicas y termodinámica de la combustión. Ver Figs. 2.10. y 2.11.



Figura 2.10. Cesto Combustor de una Turbina a gas PGT5.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

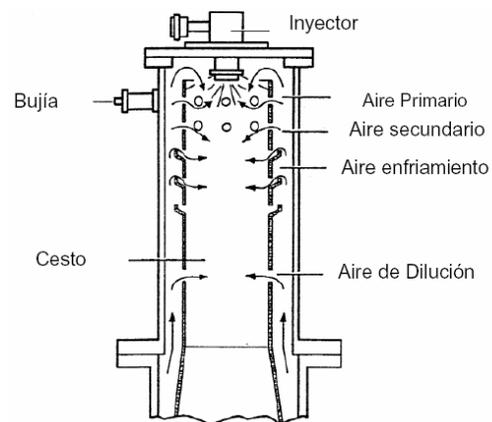


Figura 2.11. Esquema de la entrada de aire al Cesto Combustor.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.3. Pieza de transición

Transfiere los gases calientes, productos de la combustión a las toberas de primera etapa. Dada la configuración de la turbina, está diseñada para distribuir el flujo uniformemente a través de las toberas.

En la Fig. 2.12. se muestra la pieza de transición de la turbina a gas PGT5.



Figura 2.12. Pieza de transición de una turbina a gas PGT5.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.4. Toberas

Están compuestas de una serie de álabes que forman un pasaje donde los gases calientes productos de la combustión son acelerados y dirigidos a la rueda de la turbina. En el modelo de turbina PGT5 existen dos (2) toberas

Las toberas de 1^{ra} etapa son los componentes que están sometidas a mayor fatiga térmica en toda la sección de la turbina.

Como las turbinas de modelo PGT5 son de doble eje una de las toberas es de abertura variable, con la finalidad de controlar la velocidad del eje de alta entre 98 % y 105 %

En la Fig. 2.13. se muestran las Toberas de una turbina a gas PGT5.



a) Toberas de 1^{ra} eta b) Tobera de álabes variables

Figura 2.13. Toberas de una turbina a gas PGT5.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.5. Eje o Rotor de alta presión (HP)

Este eje genera la potencia para mover el compresor axial, gira sobre dos cojinetes portantes, llamados cojinetes 1 y 2. Está compuesto por la parte rotórica del compresor axial y las ruedas de turbina. El modelo PGT5 posee solo una rueda de turbina (1^{ra} etapa). Cada rueda de turbina está formada por una serie de álabes, al pasar los gases calientes a través de estos álabes, se produce un cambio de energía que hace girar el eje.

En la Fig. 2.14. se muestra el eje o rotor de alta presión de una turbina a gas PGT5.



Figura 2.14. Eje o Rotor de alta presión de una turbina a gas PGT5.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.6. Eje o Rotor de Baja Presión (LP)

Es el que genera la potencia para mover la carga. En las turbinas PGT5 acciona compresores centrífugos y gira sobre dos cojinetes portantes, llamados cojinetes 3 y 4. Al igual que el eje de alta, en este se observa una rueda (2^{da} etapa).

En la Fig. 2.15 se muestra eje o rotor de baja presión de una turbina a gas PGT5.



Figura 2.15. Eje o Rotor de baja presión de una turbina a gas PGT5.

Fuente: Taller turbinas a gas PGT5. (2005)

2.2.6.7. Álabes de las turbinas a gas

El álabe consiste de una sección aerodinámica que es la ruta expuesta al paso de los gases. Los álabes están sometidos a grandes esfuerzos de fatiga al trabajar en condiciones extremas donde soportan grandes fuerzas vibratorias.

El diseño y mecanizado de los álabes es muy complicado porque tiene que adaptarse para poder soportar las condiciones de trabajo a las que está sometido, y tendrá que tener por tanto gran rigidez y una geometría adecuada para distribuir todos los esfuerzos cuando operan en resonancia.

Los álabes son perfiles aerodinámicos que reciben el gas y lo hacen cambiar de velocidad y presión, absorbiendo así la energía. Van sujetos al eje, formando las llamadas ruedas [8].

2.2.6.7.1. Mecanismo de fallas en álabes de turbinas

Una falla de un componente o parte en servicio puede ser ocasionada por uno de los siguientes factores o la combinación de ellos: diseño impropio, deficiencia en la selección del material, imperfecciones en el material, deficiencias en el proceso de fabricación, deficiencias en el proceso de ensamblaje y condiciones de servicios apropiados [8].

2.2.7. Falla

Es la ocurrencia no previsible, inherente al elemento de un equipo que impide que este cumpla la misión para la cual fue diseñado, también se define, como la aparición de deformación permanente, que modifica las dimensiones y propiedades mecánicas de un componente.

Toda falla tiene efectos directos e indirectos sobre el sistema (funcionamiento o seguridad) los cuales dependen del contexto operacional, de los estándares de funcionamiento y de los efectos físicos de cada modo de falla.

2.2.7.1. Tipos de Falla

De acuerdo a su alcance:

- Parcial: origina desviaciones en las características de funcionamiento de un equipo fuera de límites especificados, pero no genera incapacidad total para cumplir su función.
- Total: origina desviaciones o pérdidas de las características de funcionamiento de un equipo, tal que produce incapacidad para cumplir la función para la cual fue diseñado.

De acuerdo a su velocidad de aparición:

- Progresiva: es aquella en la que se observa la degradación de funcionamiento de un equipo y puede ser determinada por un examen anterior de las características del mismo.
- Intermitente: es aquella que se presenta alternativamente por lapsos limitados.
- Súbita: es la que ocurre de forma instantánea, y no puede ser prevista por un examen anterior de las características del equipo.

De acuerdo a su impacto:

- Menor: es aquella que no afecta los objetivos de producción o de servicio.

- Mayor: es la que afecta parcialmente los objetivos de producción o de servicios.
- Crítica: es aquella que afecta totalmente los objetivos de producción o de servicios.

De acuerdo a su dependencia:

- Independiente: son fallas cuyas causas son inherentes al mismo equipo.
- Dependientes: son fallas del equipo cuyo origen es atribuible a una causa externa [9].

2.2.7.2. Modos de Falla

El modo de falla es la causa de cada falla funcional; es el que provoca la pérdida de función total o parcial de un activo en su contexto operacional (cada falla funcional puede tener más de un modo de falla) [10].

2.2.7.3. Efectos de las fallas

Son los eventos o hechos que pueden observarse si se presenta un modo de falla en particular, es decir, permite definir lo que sucede al producirse cada modo de falla [10].

2.2.8. Contexto operacional

Algunos de los factores importantes que deben ser considerados son:

- Si el activo físico es parte de un proceso continuo o por lotes.

- La presencia de redundancia o modos de producción alternativa.
- Los parámetros de calidad que se requieren del producto determinado.
- El contexto operacional y los estándares ambientales.
- Riesgos para la seguridad.
- Turnos de trabajo.
- Volúmenes de almacén de productos terminados y de trabajo en proceso.
- Tiempo de reparación.
- Política de repuestos en almacén.

2.2.9. Criticidad de equipos

Es una clasificación que se establece para destacar la relevancia (jerarquía o prioridad), que tiene un determinado equipo o sistema dentro del proceso al cual pertenece [11].

2.2.10. Análisis de Criticidad (AC)

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, determinado por la evaluación ponderada de criterios operacionales, ambientales y de seguridad, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Definiendo un alcance y propósito para el análisis.
- Estableciendo los criterios de importancia.
- Seleccionando un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis.

Los criterios que se utilizan son: seguridad, ambiente, producción, costo, frecuencia de fallas, tiempo promedio entre fallas, entre otros. El análisis de criticidad se debe aplicar cuando estén presentes las siguientes necesidades: fijar prioridad en sistemas complejos, administrar recursos escasos, determinar impacto, aplicar otras metodologías como por ejemplo: análisis de fallas, análisis causa raíz, entre otros. Este tipo de análisis aplica en cualquier conjunto de procesos, planta, sistemas, equipos y/o componentes que requieren ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso. Sus áreas comunes de aplicación son: mantenimiento, inspección, materiales y repuestos, disponibilidad de instalaciones, personal. Las herramientas estadísticas son de uso común en este tipo de análisis y la información normalmente se encuentra en los historiales de la planta.

2.2.11. Análisis Causa Raíz (ACR)

Es una metodología que permite de forma sistemática, identificar las causas raíces físicas, humanas y latentes de los problemas, para luego aplicar correctivos (soluciones) que disminuya su efecto al identificar la condición que propicia dicho evento [12].

En el Análisis Causa Raíz la herramienta fundamental es un árbol lógico de fallas, el cual es una ayuda en la resolución de problemas, que guía hacia el descubrimiento de las causas de problemas a través de pensamientos lógicos relacionados con el evento de falla. Para su construcción se debe:

- Describir el evento.
- Describir el modo o modos posibles de falla.
- Formular hipótesis.
- Validar hipótesis.

- Determinar causas físicas, humanas y latentes.

2.2.11.1 Estructura del árbol lógico de fallas para un ACR

La Fig. 2.16 muestra la estructura de un árbol lógico de falla.

Donde:

- Evidencias Físicas: Son todas las evidencias reales encontradas una vez que ocurre el evento no deseado.
- Hipótesis: Son todos los posibles mecanismos que originan los eventos de falla.
- Raíces físicas: Son todas aquellas situaciones o manifestaciones de origen físico que afectan directamente la continuidad operativa de los equipos o sistemas, por ejemplo: flujo mínimo por bloqueo de una tubería, malas conexiones, repuestos defectuosos, entre otros. Generalmente en este nivel no se encontrará la causa raíz de la falla, si no un punto de partida para localizarla.
- Raíces humanas: Son todos aquellos errores cometidos por el factor humano y que inciden directa ó indirectamente en la ocurrencia de una falla, por ejemplo, instalación inapropiada, errores en el diseño, no aplicar correctamente los procedimientos pertinentes, entre otros.
- Raíces latentes: Todos aquellos problemas que aunque nunca hayan ocurrido, son factibles su ocurrencia, por ejemplo, falta de procedimientos para

arranque ó puesta fuera de servicio, inapropiados procedimientos de operación, personal sin adiestramiento, entre otros [12].

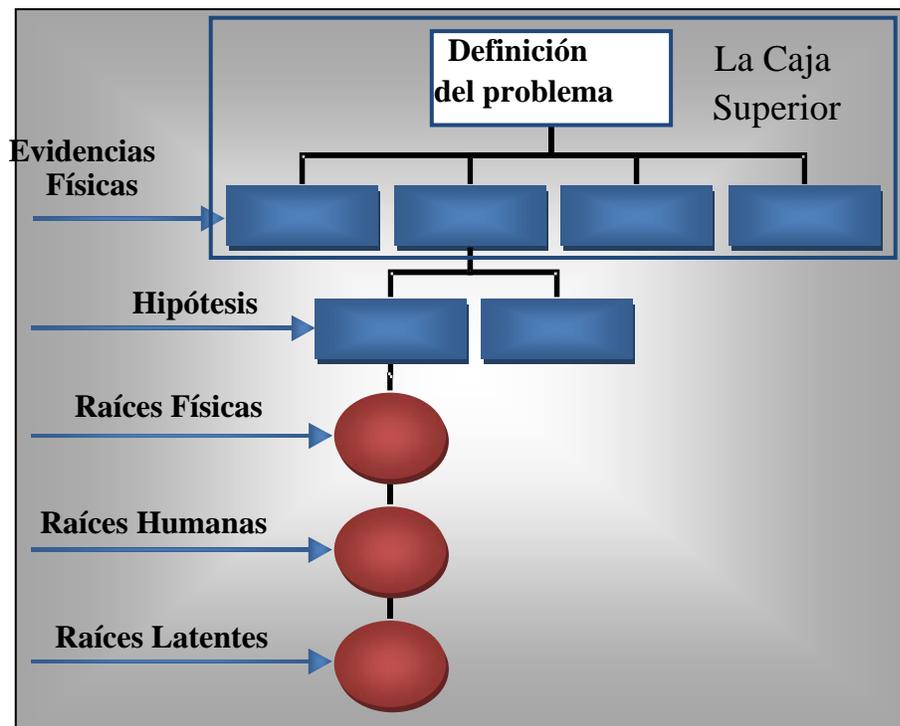


Figura 2.16 Árbol lógico de fallas para un ACR.

Fuente: propia. (2009)

2.2.11.2. Beneficios Generados por el Análisis Causa Raíz

- Reducción del número de incidentes, fallos y desperdicios.
- Reducción de gastos asociados a fallos.
- Mejoramiento de la confiabilidad, la seguridad y la protección ambiental.
- Mejoramiento de la eficiencia, rentabilidad y productividad de los procesos.

2.2.11.3. Impacto Luego de la Aplicación de un ACR

Se han visto casos en los cuales la realización del ACR en una planta constituye un punto de partida para el mejoramiento del resto de las plantas y de toda la empresa, pues las causas raíces de fallos catastróficos descubiertas en una planta, después de estudios se han encontrado que, generalmente son las mismas causas de las otras plantas. Esto permite que en el futuro no ocurra el mismo fallo en el área, unidad o planta estudiada ni en ninguna otra, por tal motivo hay quienes llaman al ACR la herramienta para “Aprender a Aprender” [12].

2.2.12. Proceso de Diagnóstico

El diagnóstico, es un análisis que se realiza para determinar cuál es la situación y cuáles son las tendencias de la misma. Esta determinación se realiza sobre la base de informaciones, datos y hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permiten juzgar mejor qué es lo que está pasando [13]. En otras palabras, el diagnóstico es el punto de partida para diseñar operaciones y acciones que permiten enfrentar los problemas y necesidades detectadas en el mismo [14].

De forma general para realizar un diagnóstico, se deben cumplir con los siguientes pasos:

- Observación.
- Descripción (es necesario un lenguaje).
- Clasificación.
- Agrupación.
- Identificación de relaciones significativas.
- Observación crítica de los atributos (características).

- Selección de unas prioridades.
- Desarrollo de un criterio.
- Diagnosticar.

En el mantenimiento, un diagnóstico de los equipos o sistemas permite conocer el estado en que se encuentran y a la vez permite conocer con cuántos equipos se cuentan, así como la ubicación y función de cada uno dentro del sistema, en tal sentido, para que este análisis presente resultados eficientes, se debe cumplir con algunos requerimientos, entre los que se encuentran:

Ubicación del equipo dentro de la empresa:

En esta etapa se deben responder preguntas tales como, ¿Cuál es la función del equipo?, ¿Qué beneficios y gastos genera el equipo?, entre otras interrogantes que permitan definir el uso del equipo y la relevancia del mismo en el proceso productivo en el cual se encuentra involucrado.

Estado de los equipos:

Para esta fase, se analizan aspectos externos de los equipos, tales como nivel de limpieza y orden de los equipos, estado de oxidación de algunos componentes, entre otros aspectos.

Cantidad de mantenimiento aplicado:

Para esta etapa se estudian aspectos de la planificación y ejecución de las tareas de mantenimiento que son aplicadas a los equipos en estudio.

2.2.13. Ponderación de factores

La ponderación es un método que permite subrayar la importancia de los diversos factores que concurren en un hecho mediante la asignación de coeficientes adecuados [13], es decir la ponderación de factores es la consideración equilibrada y compensada que se da a unos argumentos o valores de forma proporcional a su importancia. La ponderación puede realizarse de forma cuantitativa asignando a cada factor un valor que comúnmente está expresado en porcentajes.

2.2.14. Mantenimiento

Conjunto de actividades que permiten mantener un equipo o sistema en condición operativa, de tal forma que cumplan las funciones para las cuales fueron diseñadas y designadas o restablecer dicha condición cuando esta se pierde. El mantenimiento puede ser clasificado de acuerdo al tipo de falla que presente el activo

2.2.14.1. Tipos de mantenimiento

De acuerdo al tipo de falla se tiene:

- **Mantenimiento preventivo.** Es una actividad planificada en cuanto a inspección, detección y prevención de fallas, cuyo objetivo es mantener los equipos bajo condiciones específicas de operación. Se ejecuta a frecuencias dinámicas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, las condiciones operacionales y la historia de fallas de los equipos. Dentro del mantenimiento preventivo se destacan los siguientes:

- **Mantenimiento Sistemático:** Son actividades establecidas en función del uso del equipo (horas, km, entre otros). Se aplica cuando la frecuencia de ejecución del mantenimiento es conocida [9].
- **Mantenimiento Predictivo:** Es un conjunto de actividades destinadas a mantener el equipo en su condición de operación normal, basado en predecir la falla en un equipo antes de que esta se produzca, escogiendo como momento de intervención el estado más próximo a la falla, la cual se logra mediante monitoreo. Este tipo de mantenimiento es la mejor forma de impedir que suceda una falla o en todo caso, minimizar su ocurrencia y efectos negativos [9].
- **Mantenimiento Condicional:** Se refiere a las actividades basadas en el seguimiento del equipo mediante diagnóstico de sus condiciones. Se recomienda su utilización cuando la frecuencia de inspección y ejecución del mantenimiento sea desconocida [9].
- **Mantenimiento de Ronda:** Consiste en una vigilancia regular a frecuencias cortas [9].
- **Mantenimiento Proactivo:** Es un tipo de mantenimiento preventivo, en el cual preventivamente se sustituye un componente de equipo por otro de mejor calidad o sea, de otra especificación técnica basándose en el manejo del cambio, a fin de incrementar significativamente la confiabilidad del equipo en estudio. El mantenimiento proactivo usa gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación del equipo. La parte mayor de un programa proactivo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en los activos [9].

- **Mantenimiento Correctivo.** Es una actividad que se realiza después de la ocurrencia de una falla. El objetivo de este tipo de mantenimiento consiste en llevar los equipos después de una falla a sus condiciones originales, por medio de restauración o reemplazo de componentes o partes de equipos, debido a desgastes, daños o roturas. Se clasifica en:
 - **No planificado:** Es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia ya sea por una avería imprevista a reparar lo mas pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, entre otros).
 - **Planificado:** Se sabe con antelación que es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuarse la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente

Dentro del mantenimiento correctivo se encuentran:

- **Mantenimiento de Mejoras:** Este mantenimiento se encarga de hacer reparaciones basadas en reemplazos de componentes de mejor calidad a fin de incrementar el tiempo entre falla de los equipos o mitigar una falla repetitiva
- **Mantenimiento Paliativo (arreglo temporal):** Este se encarga de la reposición del funcionamiento, aunque no quede eliminada la fuente que provocó la falla.

- **Mantenimiento Curativo:** Este se encarga propiamente de la reparación, eliminando las causas que han producido la falla. Suelen tener un almacén de recambio (stock), donde algunos componentes son comunes [9].

2.2.15. Seguridad Industrial, Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO)

Es un factor que pondera los efectos de las consecuencias que se puedan generar sobre el personal de labores, medio ambiente y los equipos en general.

El total de los puntos obtenidos tanto en el área de mantenimiento como operacional son evaluados para determinar la criticidad de los equipos que intervienen en el proceso productivo [11].

2.2.16. Identificación Positiva de Materiales (PMI)

Con la Identificación Positiva de Materiales (PMI) se puede determinar claramente la composición de la aleación de los materiales y por ende su identidad. Si un material carece de certificación o ésta no es clara, con esta técnica se puede conocer con certeza su composición.

PMI se utiliza particularmente para metales de alta calidad, como el acero inoxidable y los metales de alta aleación. Ahora que los ingenieros están llevando las capacidades de los materiales al límite del diseño, es de suma importancia tener la certeza de que se está utilizando el material adecuado.

Existen dos métodos para PMI: El principio de fluorescencia de rayos X es uno de los métodos. El equipo contiene fuentes radiactivas, las cuales emiten radiación. El material expuesto envía de vuelta radiación específica por elemento, generando

energía. Puesto que cada elemento tiene su propia estructura atómica, esta reflexión generará un nivel de energía distinto para cada elemento. Esta energía se detecta y se cuantifica, identificando la aleación del material. La radiación no es emitida en cantidades tales que se precisen medios adicionales de seguridad.

La ventaja más importante de este método es que éste puede ser ejecutado sin dañar el objeto. Inmediatamente después de la evaluación se recibe los resultados.

El otro método para PMI es “Espectrografía mediante Emisión de Chispa”. La espectrografía se basa en emisión óptica. El equipo lanza una chispa que se utiliza para vaporizar el material que es analizado. Los átomos y los iones en este vapor producen un espectro que se puede medir en forma óptica y recalcularse para determinar los componentes del material.

Las características del material, tales como diferencias estructurales y tratamientos térmicos, no ejercen ninguna influencia en los resultados de las medidas del PMI. Sin embargo, es importante que la superficie sea idéntica al resto del material. Los óxidos, recubrimientos y suciedad influirán en los resultados. La superficie debe ser también lisa. Los elementos que se pueden identificar usando PMI incluyen: Ti, V, Cr, Mn, Co, Fe, Cu, Zn, Ni, Se, Nb, Mo. Es importante recalcar que la radiación es lo suficientemente baja para necesitar medidas de seguridad adicionales [15]. Para realizar estas pruebas se utiliza un analizador portátil para reconocer aleaciones, el cual se puede observar en la Fig. 2.17.



Figura 2.17. Analizador Portátil para reconocer aleaciones mediante PMI.

Fuente: Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose. (2009)

2.2.17. Superaleaciones

Las superaleaciones constituyen una categoría que sobrepasa los metales ferrosos y no ferrosos. Algunas se basan en el hierro, otras en el níquel y el cobalto. De hecho muchas de las superaleaciones contienen cantidades sustanciales de tres o más metales, más que un solo metal con elementos de aleación.

Las superaleaciones son un grupo de aleaciones de alto desempeño diseñadas para satisfacer requerimientos muy estrictos de resistencia mecánica y resistencia a la degradación superficial (corrosión y oxidación) a altas temperaturas de servicio. La resistencia convencional a temperatura ambiente no es usualmente el criterio importante para estos metales, y muchos de ellos tienen propiedades de resistencia a temperatura ambiente que son buenas, pero no sobresalientes. Lo que distingue su desempeño a altas temperaturas, resistencia a la tensión, dureza en caliente resistencia a la termofluencia, así como su resistencia a la corrosión a temperaturas muy elevadas son las propiedades mecánicas que interesan. Las temperaturas de operación están frecuentemente alrededor de los 2000 °F (1100 °C) [16].

Las Superaleaciones se dividen normalmente en tres grupos, de acuerdo con su constituyente principal: hierro, níquel o cobalto:

- Aleaciones basadas en el hierro. Estas aleaciones tienen hierro como elemento principal, aunque en algunos casos el hierro está en una proporción menor al 50 % de la composición total.
- Aleaciones basadas en el níquel. Estas aleaciones tienen por lo general mejor resistencia a las altas temperaturas que los aceros aleados. El níquel es el metal base. Los principales elementos aleantes son el cromo y el cobalto; elementos menores son el aluminio, el titanio, el molibdeno, el niobio y el hierro.
- Aleaciones basadas en el cobalto. Los elementos principales en estas aleaciones son el cobalto (alrededor del 40 %) y el cromo (quizás un 20 %); otros elementos aleantes son níquel, molibdeno y tungsteno [16].

En la tabla 2.1 se muestran las Composiciones típicas de las superaleaciones.

Tabla 2.1. Composiciones típicas de las Superaleaciones.

Superalación	Análisis químico, % ^a								
	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W	Nb	Ti	Otros ^b
Basadas en el hierro									
Incoloy 802	46	32		21				<1	<1
Haynes 556	29	20	20	22	3				6
Basadas en el níquel									
Incoloy 807	25	40	8	21		5			1
Inconel 718	18	53		19	3		5		1
Rene 41		55	11	19	1			3	2
Hastelloy S	1	67		16	15				1
Nimonic 75	3	76		20				<1	<1
Basadas en el cobalto									
Stellite 6B	3	3	53	30	2	5			4
Haynes 188	3	22	39	22		14			
L-605		10	53	20		15			2

Fuente: Hoffman E.G. (1984)

2.2.18. Nimonic 75

Es una de las muchas superaleaciones disponibles en todos los metales y Forja. Se trata de un grado de Nimonic que se utiliza en aplicaciones donde la resistencia a la corrosión y el calor es la clave. Puede soportar la enorme cantidad de presión y las altas temperaturas. La tabla 2.12 muestra las propiedades de la superaleación NIMONIC 75 [16].

2.2.19. Aceros Inoxidables Martensíticos

Los aceros inoxidables Martensíticos (tabla 2.3) son esencialmente aceros al cromo sólo (11 a 18 %) que contienen pequeñas cantidades de otros elementos de aleación, como a veces níquel, pero en este caso en cantidad nunca superior al 2,5 %. Los contenidos de carbono pueden variar entre un mínimo del 0,08 % hasta un máximo de aproximadamente, el 1,20 %. A temperatura elevada presentan microestructura austenítica, que se transforma en martensita al enfriar rápidamente. Son magnéticos, resistentes a la corrosión en medios moderadamente agresivos y por tratamiento térmico pueden alcanzar resistencia a la tracción del orden de los 1400 MPa [16].

Tabla 2.2. Propiedades de la superaleación NIMONIC 75.

Nimonic 75* - Marca de Special Metals Group of Companies		W.N.R. 2.4630 UNS N06075 AWS 032
El Nimonic 75 es una aleación de níquel-cromo con buena resistencia a la corrosión y al calor. Ampliamente utilizado en la fabricación de elementos de sujeción en la industria aeronáutica.		
Composición química aproximada (%)	Ni 75 Fe <5	
Densidad (g/cm³)	8,37	Punto de fusión (°C) 1380
Coefficiente de dilatación	11,0 µ m/m °C a 20 - 100 °C	
Normas	BS HR504	
Tratamientos térmicos	Trabajado en frío pesado	Recocido de ablandamiento a 450 - 470 °C durante 30-60 min.
Límite de resistencia a la tracción	Recocido	700 - 800 N/mm ²
Módulo de rigidez	75,6 kN/mm ²	
Módulo de elasticidad	206 kN/mm ²	
Temperaturas aproximadas de servicio	-200 a 1100 °C (para aplicaciones con cargas ligeras)	

Fuente: Alloywire. (2009)

En la tabla 2.3 se muestran los tipos de aceros inoxidable martensíticos.

Tabla 2.3. Tipos de Aceros inoxidable Martensíticos.

Tipo	Núm. UNS	Composición, %							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Otros
403	S40300	0,15	1,00	0,50	11,5-13,0	...	0,04	0,03	...
410	S41000	0,15	1,00	1,00	11,5-13,0	...	0,04	0,03	...
414	S41400	0,15	1,00	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	0,04	0,03	...
416	S41600	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0	...	0,04	0,03	0,6 Mo
416Se	S41623	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0	...	0,06	0,06	0,15 min Se
420	S42000	0,15 min	1,00	1,00	12,0-14,0	...	0,04	0,03	...
420F	S42020	0,15 min	1,25	1,00	12,0-14,0	...	0,06	0,15 min	0,6 Mo
422	S42200	0,20-0,25	1,00	0,75	11,0-13,0	0,5-1,0	0,025	0,025	0,75-1,25 Mo 0,75-1,25 W; 0,15-0,3 V
431	S43100	0,20	1,00	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	0,04	0,03	...
440A	S44002	0,60-0,75	1,00	1,00	16,0-18,0	...	0,04	0,03	0,75 Mo
440B	S44003	0,75-0,95	1,00	1,00	16,0-18,0	...	0,04	0,03	0,75 Mo
440C	S44004	0,95-1,20	1,00	1,00	16,0-18,0	...	0,04	0,03	0,75 Mo
501	S50100	0,10 min	1,00	1,00	4,0-6,0	...	0,04	0,03	0,40-0,65 Mo
501A	S50300	0,15	0,30-0,60	0,50-1,00	6,0-8,0	...	0,03	0,03	0,45-0,65 Mo
501B	S50400	0,15	0,30-0,60	0,50-1,00	8,0-10,0	...	0,03	0,03	0,9-1,1 Mo
502	S50200	0,10	1,00	1,00	4,0-6,0	...	0,04	0,03	0,40-0,65 Mo
503	S50300	0,15	1,00	1,00	6,0-8,0	...	0,04	0,04	0,45-0,65 Mo
504	S50400	0,15	1,00	1,00	8,0-10,0	...	0,04	0,04	0,9-1,1 Mo

Fuente: Hoffman E.G. (1984)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo de la investigación se elaboró el marco metodológico como sustento para el desarrollo del trabajo, con el propósito de encontrar respuestas a las interrogantes y objetivos formulados.

Cabe destacar que la metodología empleada fue la siguiente:

3.1. Tipo de investigación

El nivel del estudio y evaluación, se refiere al grado de profundidad con que se aborda el problema. En función a esto, el estudio que se refiere al Análisis Causa Raíz de una turbina a gas, caso: Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose está definido así:

3.1.1. Según la estrategia

En el proyecto se utilizó una investigación mixta debido a que se utilizaron dos tipos, ya que se realizó de la siguiente manera:

- Investigación documental. Debido a que está sujeta en la consulta de documentos bibliográficos, manuales y catálogos de los equipos, todos éstos enfocados en los procedimientos y metodologías del área de mantenimiento.
- Investigación de campo. La cual permitió obtener la información necesaria directamente del área en el cual está ubicada la máquina en estudio, donde se

pudo observar las necesidades físicas reales de las actividades que se plantearon.

3.1.2. Según su propósito

De acuerdo a los resultados obtenidos durante la investigación, ésta puede ser clasificada como aplicada, ya que se usaron los conocimientos teóricos relacionados con el área de mantenimiento los cuales fueron ajustados al contexto de las actividades formuladas y actualmente ejecutadas por la turbina en estudio.

3.1.3. Según el nivel de conocimiento

El estudio es de tipo descriptivo ya que se orientó a recolectar información relacionada con el estado real de las personas, objetos, situaciones o fenómenos; tal y como se presentaron en el momento de la recolección. Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis.

Todo el proceso de este estudio estuvo orientado estratégicamente desde el punto de vista técnico, desde la recolección de datos hasta el análisis e interpretación de los mismos; se busca identificar causas que evitan el buen funcionamiento del sistema en estudio y analizar mejoras que propicien a la turbina su operación en un ambiente de trabajo confiable, con el fin de aumentar su confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

3.2. Población y muestra en estudio

La población involucrada en este estudio se enmarca en la turbina PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose y en una

población humana garantizando un estudio lo más acorde posible para la propuesta estratégica. Para el caso en estudio se consideró una población humana de dos planificadores, dos mantenedores y dos operadores, basándose en los conocimientos y experiencias laborales dentro de la organización.

La muestra está conformada por la turbina a gas PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose y seis (6) personas que trabajan directamente con el sistema involucrado en el estudio a los cuales se le realizaron encuestas no estructuradas, considerándose así una muestra no probabilística de tipo intencional.

3.3. Técnicas para recopilación de información

Para la realización de este trabajo se revisó y recolectó información relacionada con la turbina a gas PGT5 sujeta a estudio. Las principales técnicas utilizadas para obtener la información necesaria que se requieren en la investigación son:

- Recopilación bibliográfica. Previamente a la realización de la investigación, se buscó material bibliográfico y documental que se utilizó como soporte técnico en la realización del proyecto. Se realizaron investigaciones y se revisaron libros de textos, tesis de grado, ponencias, informes técnicos, procedimientos de trabajos, manuales del fabricante de las turbinas y se consultó en Internet, lo cual sirvió de apoyo técnico en la elaboración del trabajo.
- Entrevista no estructurada o libre. En esta técnica se realizaron entrevistas no estructuradas e informales basadas en conversaciones con mecánicos, operadores, planificadores y otros trabajadores con amplio conocimiento del

funcionamiento de la máquina; éstas permitieron obtener gran parte de la información necesaria para la elaboración del trabajo.

- Observación directa. Esta técnica permitió recolectar información de la máquina en estudio directamente en el área de operación, verificar sus condiciones y conocer sus actividades de mantenimiento. Se utilizó la ayuda del personal de mantenimiento y encargados del área de refrigeración 380 (operadores, técnicos, entre otros) para realizar esta técnica.

3.4. Técnicas para el procesamiento de datos

Análisis de criticidad. Se utilizó esta técnica ya que se ajusta a las condiciones operacionales de la planta, esta metodología permitió establecer una jerarquización de las fallas más críticas que presenta la máquina, orientándose en el impacto que tienen a nivel operacional, de seguridad y ambiental. Se usó un método de factores ponderados, estableciéndose la escala No crítico, Semi-crítico y Crítico.

Análisis Causa Raíz (ACR). Esta metodología permitió de forma sistemática, identificar las causas raíces físicas, humanas y latentes de la falla real más crítica que presentó la turbina.

En esta técnica se usó un árbol de lógica o árbol lógico de fallas, construido mediante hipótesis que se formularon a medida que se iba estudiando el problema.

Manejo de Herramientas de Computación. Estas fueron de mucha ayuda para la investigación ya que sirvieron para la ejecución de los cálculos y el procesamiento de la información. En esta investigación se utilizó: Microsoft Word, Excel y Power Point.

3.5. Etapas de la investigación

La realización de este trabajo se dividió en 6 etapas, las cuales se describen a continuación:

3.5.1. Revisión bibliográfica

En esta etapa se recopiló toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto, a través de catálogos de los fabricantes, manuales de las turbinas, antecedentes similares al problema en estudio, textos, páginas de Internet, entre otros.

3.5.2. Descripción del contexto operacional de la turbina a gas PGT5

En esta fase se observó el funcionamiento de la turbina al igual que los diferentes componentes que conforman a la misma, a través de la lectura de los distintos parámetros de operación reflejados en la pantalla HMI.

La pantalla HMI proporcionó en forma esquemática, toda la información necesaria para saber como operó la máquina. Esta pantalla está ubicada en el panel de control del área de refrigeración 380 (ver anexo B). También se utilizó la información de los historiales de falla y algunos parámetros de funcionamiento obtenidos en la etapa anterior. Dentro de los datos que se obtuvieron en los historiales de fallas están los tiempos fuera de servicio y la descripción de cada falla presentada por la máquina.

3.5.3. Análisis de criticidad a la turbina a gas PGT5

Para jerarquizar las fallas de la máquina en estudio, se aplicó una matriz de criticidad basada en ponderaciones atribuibles a los distintos parámetros involucrados

en la misma. Dicha matriz permitió la evaluación del impacto global de las fallas, constituido por el grado de afectación a nivel operacional, ambiental y de seguridad que genera la ocurrencia de las mismas ante el contexto en el que opera la unidad.

Dicha matriz de ponderación se desarrolló bajo el principio estadístico de distribuciones de frecuencias de datos no agrupados, para la creación de intervalos de clase o rangos (Ec. 3.1), en los cuales han sido discriminados los distintos parámetros considerados. Dependiendo del grado de afectación de dicho parámetro, a este se le asignó un valor que incrementa a medida que se genera un efecto adverso o negativo, y viceversa.

$$I = \frac{(Va - Vb)}{N}. \quad (3.1)$$

Donde,

I: Intervalo de clase.

Va: Valor más alto.

Vb: Valor más bajo.

N: Número de clases.

3.5.3.1. Tiempo fuera de servicio

Es el tiempo que transcurre desde que falla el equipo hasta que vuelve a arrancar. El valor utilizado en el análisis de criticidad corresponde a la suma de todos los tiempos fuera de servicio de las fallas ocurridas en el periodo evaluado (Enero 2007-Diciembre 2007), tal como se muestra en la Ec. 3.2.

$$TFS = Tfs_1 + Tfs_2 + \dots + Tfs_N \quad (3.2)$$

Donde,

TFS: Tiempo fuera de servicio total en un periodo determinado.

Tf_{SN}: Tiempo fuera de servicio de una falla ocurrida.

3.5.3.2. Impacto operacional

Este impacto se encuentra constituido por parámetros operativos inherentes a las fallas que ha presentado el equipo, siendo estos la cantidad de veces que se repite el evento (cantidad de fallas) y el tiempo en promedio que transcurre el equipo fuera de servicio por efectos de la falla (Tiempo Promedio Fuera de Servicio, (TPFS)).

Los datos necesarios para determinar dichos parámetros fueron obtenidos del registro de fallas del año 2007 que posee la gerencia de mantenimiento mayor (Anexo C).

Para determinar la cantidad de fallas se clasificaron las mismas según el nombre de la alarma que indicó el panel de la unidad, y se sumó el número de veces que se generó la misma durante el tiempo de estudio y el tiempo fuera de servicio es el tiempo que transcurre desde que falló el equipo, hasta que volvió a arrancar. Por su parte, el Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS) se obtuvo a través de la Ec. 3.3.

$$TPFS = \frac{\sum (\text{Tiempo Fuera de Servicio})}{\text{Cantidad de fallas}} \quad (3.3)$$

Seguidamente, tal como se indicó al inicio de la sección 3.5.3, se procedió a determinar los rangos correspondientes a la clasificación del número de fallas y del TPFs, haciendo uso de la Ec.3.1 para cada caso.

3.5.3.3. Impacto en seguridad

Para la obtención del impacto en seguridad se realizaron entrevistas al personal de Seguridad Integral Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO), con el fin de identificar los riesgos en la seguridad de los trabajadores ante la presencia de las fallas anteriormente expuestas. Se atribuyó un valor para cada falla, resultando:

1. En caso de que la respuesta sea “Si”= 1.
2. Ante respuesta negativa “No”= 0.

3.5.3.4. Impacto ambiental

Para la obtención del impacto ambiental se procedió de igual manera que para la estimación del impacto en seguridad, incluyendo la realización de entrevistas al personal de Seguridad Integral Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO). La pregunta en este caso particular fue la siguiente: ¿Afecta el entorno a través de ruido, generación de altas temperaturas o gases con efecto Invernadero? Se atribuyó un valor a cada respuesta de la siguiente manera:

- En caso de respuesta afirmativa, “Si”= 1.
- Para respuestas negativas, “No”= 0.

3.5.3.5. Impacto Global

Para la obtención del impacto global se realizó una sumatoria de las ponderaciones obtenidas a nivel operacional, ambiental y en seguridad y luego bajo el principio estadístico de distribuciones de frecuencias de datos no agrupados se clasificaron y se agruparon por rango de afectación en Criticidad alta, intermedia y baja que genera cada falla en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.

3.5.4. Identificación de las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas más críticas de la turbina a gas PGT5

Para identificar las raíces físicas, humanas y latentes se utilizó el análisis causa raíz con el fin de encontrar la causa verdadera que originó la falla real más crítica de la máquina en estudio. Dicha técnica requirió la conformación de un equipo multidisciplinario, con competencia en las áreas de mantenimiento operacional, confiabilidad, turbomáquinas, mantenimiento mayor, seguridad industrial, ambiente e higiene ocupacional, el cual facilitó la recopilación de información asociada a las evidencias del evento y las posibles causas de la falla a partir de entrevistas no estructuradas.

3.5.4.1. Formulación de hipótesis y construcción del árbol lógico de fallas

Las hipótesis representan la manera en la cual se dió el modo de falla. Para esta investigación las hipótesis fueron formuladas en función de las fallas ocurridas y obtenidas a través de entrevistas no estructuradas con el personal de operaciones y gerencia de mantenimiento.

Luego que se seleccionó la falla crítica o evento a analizar, se procedió a definir los modos de ocurrencia y la forma en que estos se pudieron haber presentado, en

otras palabras, las hipótesis. Seguidamente se realizó el árbol lógico de fallas definiendo las raíces físicas, humanas y latentes que se presentaron en el evento.

Cada una de las hipótesis planteadas fueron validadas o descartadas por medio de los siguientes estudios o análisis:

3.5.4.2. Identificación positiva del material

Técnica que consistió en la identificación de los elementos que constituyen la aleación en estudio, para descartar divergencias en las características de los materiales utilizados en el ensamble, con respecto a las especificaciones técnicas de diseño. Para desarrollar dicho análisis se utilizó la herramienta comercial con que cuenta la organización (Analizador Portátil para reconocer aleaciones (Ver Anexo D)).

3.5.4.3 Comparación de condiciones operacionales actuales con contexto operacional

Consistió en la corroboración de las condiciones operacionales presentadas por el equipo al momento de la falla con respecto a las condiciones correspondientes de operación normal, para descartar indicios de falla a nivel operacional.

3.5.5. Proposición de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas

En esta etapa se realizaron recomendaciones de uso y programas de adiestramiento a los operadores, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en el árbol lógico de fallas para así poder solucionar las causas raíces que originan el evento en estudio.

3.5.6. Redacción del trabajo de grado

En esta fase del trabajo de investigación se redactó y se estructuró toda la información utilizada para la elaboración del proyecto, obteniéndose conclusiones y recomendaciones de impacto significativo asociado a los objetivos planteados.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo del estudio se discuten los resultados o hallazgos derivados de la investigación, en concordancia con las interrogantes y objetivos formulados en el capítulo inicial del mismo.

4.1. Descripción del contexto operacional de la turbina a gas PGT5

La turbina a gas PGT5 (Fig. 4.1) sujeta a estudio pertenece al tren 1 del área de refrigeración 380. El Sistema de Refrigeración del área 380 se encuentra constituido por un circuito cerrado de tres niveles de refrigeración y cuatro etapas que utiliza como fluido refrigerante el gas propano. La compresión de dicho gas desde la presión inicial de 8 Psia a la presión final de 257 Psia se realiza empleando compresores centrífugos accionados por turbinas a gas de especificaciones técnicas tales como las que se indican en la Tabla 4.1, las cuales transmiten el movimiento a los compresores a través de una junta de acoplamiento y operan en paralelo conformando dos trenes de compresión constituidos cada uno por dos equipos, y un equipo anexo con función de auxiliar a los demás trenes.

El equipo en estudio opera desde el año 1992 en el área de refrigeración 380, durante 24 horas diarias, cumpliéndose desde la fecha con planes de mantenimiento a las 40000 horas de operación para mantenimiento mayor, ejecutado el último de ellos durante el año 2007.

Dicha turbina estudiada y descrita en el capítulo II cuenta con dispositivos de control durante su operación para minimizar los riesgos de afectaciones a la atmósfera por emanaciones de gases de efecto invernadero o temperaturas por encima de las recomendadas.

Los riesgos a la seguridad en condiciones normales de operación se limitan de manera global a caídas de nivel, lesiones por tacto de elementos sometidos a altas temperaturas y aspiración de gases provenientes de fugas por parte del personal. Las fallas que puede registrar el equipo están contenidas en el Anexo C.

Para aumentar los niveles de producción, la confiabilidad, mejorar las condiciones de operación y/o simplemente por obsolescencia de repuestos, en el año 2005 fue repotenciada la turbina en estudio. Esta consistió en el cambio de componentes y entonación del sistema de control con la finalidad de elevar su eficiencia total. La unidad en estudio contaba con una potencia ISO de 6800 Hp y fue aumentada a 7300 Hp, potencia que actualmente utiliza, como se observa en la Tabla 4.2.



Figura 4.1. Turbina a gas PGT5 perteneciente al turbocompresor D4-81001.

Fuente: Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose. (2009)

Tabla 4.1. Información técnica de la turbina en estudio.

Función	Transformar la energía de los gases calientes en energía mecánica para mover el compresor centrífugo
Tipo de Combustible	Gas Propano
Potencia ISO (Hp)	7300
Fabricante	Nuovo Pignone
Modelo	PGT5
Tipo de Compresor	Axial
Nº etapas del Compresor	15
Nº etapas de la Turbina	2
Velocidad eje HP (rpm)	11.140
Velocidad eje LP (rpm)	10.290
Sentido de Rotación	Antihorario

Fuente: Nuovo Pignone. (2007)

Tabla 4.2. Valores actuales de la turbina en estudio.

Temperatura del aceite de entrada a los cojinetes (°F)	90,94
Velocidad de giro del rotor de alta presión (rpm)	11143
Velocidad de giro del rotor de baja presión (rpm)	10692
Porcentaje de apertura de la SRV (%)	57,93
Porcentaje de apertura de la GCV (%)	69,77
Presión interválvular de gas combustible (Psi)	163,13
Valor mayor de Vibración (in/s)	0,24
Promedio de la temperatura de escape (°F)	924,50
Temperatura de descarga de aire en el compresor axial (°F)	669,69
Presión de descarga de aire en el compresor axial (Psi)	96,75

Fuente: Planta de Fraccionamiento Despacho Jose. (2009)

4.2. Aplicación del análisis de criticidad a la turbina a gas PGT5

Para jerarquizar las fallas de la máquina en estudio, se aplicó una matriz de criticidad basada en ponderaciones atribuibles a los distintos parámetros involucrados en la misma según lo explicado en el capítulo III de este trabajo.

4.2.1. Impacto operacional

Para la aplicación del análisis de criticidad se procedió a localizar la data de falla de la máquina y los trabajos de mantenimiento.

La organización cuenta con un registro de fallas de la máquina, estas se muestran en la tabla N° 4.3 y en esta se pueden observar las fallas presentadas por la turbina durante el año 2007, el Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS) en horas y el número de repeticiones correspondientes durante el periodo en estudio.

Para el cálculo del Tiempo promedio fuera de servicio del Item 2 (falla por pérdida de aceleración y alta vibración en eje de alta) de la Tabla 4.3, se aplicó la ecuación 3.3 y se obtuvo lo siguiente:

$$TPFS = \frac{7200 + 60,35 + 3630}{3} = 3630 \text{ horas}$$

Para cada una de las fallas se realizó también este procedimiento, lo cual se puede apreciar en los otros Ítems de la tabla 4.3.

Seguidamente, tal como se indicó al inicio de la sección 3.5.3, se procedió a determinar los rangos correspondientes a la clasificación del número de fallas y del TPFS, haciendo uso de la Ec. 3.1 para cada caso.

Tabla 4.3. TPFS correspondiente a las fallas presentadas por la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.

ITEM	EVENTOS	Nº FALLAS	TPFS
1	Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	1	159,50
2	Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	3	3630
3	Disparo por sobre velocidad	1	1,00
4	Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	2	23,50
5	Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	2	5,00
6	Disparo por falsa señal de fuego	2	0,85
7	Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	1	7,00
8	Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	1	90,00

Fuente: propia. (2009)

En cuanto al parámetro TPFS de la Tabla 4.3, se obtiene lo siguiente:

$$I = \frac{(3630-1)}{3}$$

$$I = 1209$$

En cuanto al número de fallas de la Tabla 4.3, se obtiene lo siguiente:

$$I = \frac{(3-1)}{3}$$

$$I = 0,66$$

Estos intervalos se obtuvieron de la diferencia entre el valor más alto y el más bajo que se desean evaluar entre el número de clases. En este caso, se consideran tres clases, siendo estos asociados a un impacto leve, intermedio y alto, según el caso. Se procede de igual manera para la clasificación del número de fallas.

En la Tabla 4.4, se presentan los resultados de intervalos de clase para los parámetros considerados para la evaluación a nivel operacional del impacto que han generado las fallas.

Tabla 4.4. Intervalo de clase de los parámetros de evaluación del impacto a nivel operacional de las fallas presentadas por la turbina a gas PGT5, año 2007

Cantidad de fallas	TPFS (horas/año)	Ponderación
1 a 1,67	0 a 1209	1
1,67 a 2,34	1209 a 2419	2
2,34 a 3	2420 a 3630	3

Fuente: propia. (2009)

La finalidad de obtener la ponderación de las distintas fallas presentadas en el período en estudio radica en que con la misma se pudo conocer el grado de afectación de cada falla a nivel operacional, ya que este fue un aporte importante a la hora de conocer el impacto global que genera a la máquina.

En las Tablas 4.5 y 4.6 se presentan las distintas ponderaciones designadas a cada falla según el impacto que ocasionan a nivel operacional por el TPFS y por el número de fallas, usando el intervalo calculado anteriormente.

Tabla 4.5. Ponderación designada a las falla según el impacto que ocasionan a nivel operacional por el TPFS en la turbina a gas PGT5.

Eventos	TPFS	Ponderación
Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	159,5	1
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	3630	3
Disparo por sobre velocidad	1	1
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	23,5	1
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	5	1
Disparo por falsa señal de fuego	0,85	1
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	7	1
Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	90	1

Fuente: propia. (2009)

Tabla 4.6. Ponderación designada a las fallas según el impacto a nivel operacional ocasionado por el número de fallas en la turbina a gas PGT5.

Eventos	Nº Fallas	Ponderación
Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	1	1
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	3	3
Disparo por sobre velocidad	1	1
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	2	2
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	2	2
Disparo por falsa señal de fuego	2	2
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	1	1
Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	1	1

Fuente: propia. (2009)

En la tabla 4.7 se puede observar la ponderación correspondiente a las distintas fallas presentadas por la turbina durante el periodo en estudio, según la cantidad de fallas y el TPFS, además de la ponderación total que generan dichos parámetros.

Estos valores permitieron determinar el impacto que genera a nivel operacional cada falla. En las secciones siguientes del presente capítulo se determinarán los impactos en seguridad y ambiente, que en conjunto con el impacto operacional, permitieron la jerarquización de las fallas y la identificación de aquella que perjudica en más alto grado a la turbina en estudio.

Tabla 4.7. Ponderación designada a las falla según el impacto que ocasionan a nivel operacional en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007

Eventos	TPFS	Ponderación	N° Fallas	Ponderación	Total
Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	159,5	1	1	1	2
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	3630	3	3	3	6
Disparo por sobre velocidad	1	1	1	1	2
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	23,5	1	2	2	3
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	5	1	2	2	3
Disparo por falsa señal de fuego	0,85	1	2	2	3
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	7	1	1	1	2
Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	90	1	1	1	2

Fuente: propia. (2009)

4.2.2. Impacto en seguridad

Para la obtención del impacto en seguridad se realizaron entrevistas al personal de mantenimiento y al departamento de Seguridad Integral Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO), con el fin de identificar los riesgos en la seguridad de los trabajadores ante la presencia de las fallas anteriormente expuestas. Se atribuyó un valor para cada respuesta, resultando:

- En caso de que la respuesta es “Si”= 1.
- Ante respuesta negativa “No”= 0.

4.2.3. Impacto ambiental

Para la obtención del impacto ambiental se realizaron entrevistas al personal de mantenimiento y al departamento de Seguridad Integral Ambiente e Higiene Ocupacional (SIAHO) al igual que la sección anterior, con el fin de identificar los riesgos que corre el ambiente ante la presencia de las fallas anteriormente expuestas. Se atribuyó un valor para cada respuesta, resultando:

- En caso de que la respuesta sea “Si”= 1.
- Ante respuesta negativa “No”= 0.

En las Tablas 4.8 y 4.9 se pueden observar las ponderaciones obtenidas para cada una de las fallas presentadas por la turbina a nivel de seguridad y ante el impacto ambiental respectivamente.

Una vez obtenida la ponderación del impacto operacional, ambiental y de seguridad de cada una de las fallas, se procedió a realizar una sumatoria con el fin de

obtener el impacto total que generan las mismas, tal como se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.8. Ponderación atribuida a las fallas según el impacto que generan a nivel de seguridad en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007

Eventos	¿Afecta?	Ponderación
Mtto. de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	Si	1
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	Si	1
Disparo por sobre velocidad	No	0
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	Si	1
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	No	0
Disparo por falsa señal de fuego	No	0
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	No	0
Chequeo de PCD y configuración de constantes.	No	0

Fuente: propia. (2009)

Tabla 4.9. Ponderación atribuida a las fallas según el impacto que generan a nivel ambiental en la turbina a gas PGT5, durante el año 2007.

Eventos	¿Afecta?	Ponderación
Mtto. de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	Si	1
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	Si	1
Disparo por sobre velocidad	No	0
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	Si	1
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	No	1
Disparo por falsa señal de fuego	No	0
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	No	0
Chequeo de PCD y configuración de constantes.	No	1

Fuente: propia. (2009)

Tabla 4.10. Ponderación de cada falla con respecto al impacto global de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007

EVENTOS	Impacto			
	Ambiental	En seguridad	Ambiental	Global
Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros				
Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta				
Disparo por sobre velocidad	2			2
Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	3	1	1	5
Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	3		1	4
Disparo por falsa señal de fuego	3			3
Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	2			2
Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	2		1	3

Fuente: propia. (2009)

De la tabla 4.10 puede apreciarse que la falla de mayor criticidad corresponde al Ítem 2 “pérdida de aceleración y alta vibración en eje de alta”, por cuanto corresponde a la falla que presenta el mayor impacto global (en operación, ambiente y seguridad) durante el período de estudio.

Seguidamente se aplicó la Ec. 3.1 y se obtuvo el intervalo de clase para ponderar el impacto global, tal como se indica a continuación, lo que permitió posteriormente identificar el nivel de criticidad de cada evento.

$$I = \frac{(8-2)}{3}$$

$$I = 2$$

En la Tabla 4.11 se puede apreciar el nivel de criticidad obtenido a partir del impacto global que generó cada falla.

Tabla 4.11. Identificación de nivel de criticidad a partir del impacto global que generan las fallas de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007

Impacto global	Nivel de criticidad
(2 a 3.9)	Bajo
(4 a 5.9)	Intermedio
(6 a 8)	Alto

Fuente: propia. (2009)

En la Tabla 4.12 se puede apreciar el nivel de criticidad que representó a cada falla durante el periodo en estudio.

Tabla 4.12. Nivel de Criticidad de las fallas de la turbina a gas PGT5, durante el año 2007

Item	Eventos	Ponderación	Nivel de Criticidad
1	Mantenimiento de la válvula de gas combustible y caseta de filtros	4	Intermedio
2	Perdida de aceleración y alta vibración en eje de alta	8	Alto
3	Disparo por sobre velocidad	2	Bajo
4	Corrección de fuga de aire/Paro por fuga en la línea de gas combustible	5	Intermedio
5	Falla, termocuplas de los cojinetes 2 y 4	4	Intermedio
6	Disparo por falsa señal de fuego	3	Bajo
7	Mtto. casa filtro IV/V de salida de aire de sellos	2	Bajo
8	Chequeo de PCD y configuración de constantes, por especialista	3	Bajo

Fuente: propia. (2009)

Falla de alta criticidad. Del análisis de criticidad aplicado a la turbina PGT5 se obtuvo que la falla de mayor jerarquía o criticidad se denominó “pérdida de aceleración y alta vibración en eje de alta”, resultado definido primordialmente por el número de fallas y el TPFS que integran el impacto operacional.

Cabe destacar que dichos parámetros constituyeron valores límites en la matriz conformada para la evaluación de criticidad a nivel operacional, por lo que adoptaron ponderaciones en la misma que les atribuyen mayor valoración.

Fallas de criticidad intermedia. Dentro de las fallas de nivel de criticidad intermedio se encontraron aproximadamente el 37,5 % del total de las fallas en estudio, observándose el impacto a nivel operacional como factor predominante ante los impactos en ambiente y seguridad.

Algunas fallas de este nivel de criticidad presentaron impactos globales bajos, debido a que según los estudios realizados estas no generaron impacto en seguridad y ambiente, o en su defecto, estos fueron de baja ponderación.

Fallas de criticidad leve. La mitad de las fallas presentadas se encontraron en este renglón, motivado a que el impacto global se constituyó únicamente por impacto operacional, el cual presentó bajos valores con respecto al resto de las fallas estudiadas, debido a que estas fallas presentaron pocas repeticiones y TPFS relativamente cortos en el periodo de estudio.

4.3. Identificación de las raíces físicas, humanas y latentes que inducen a las fallas críticas de la turbina a gas PGT5

Para identificar las principales causas que evitan el buen funcionamiento de la máquina sujeta a estudio se utilizó la metodología de Análisis Causa Raíz (ACR) definida en el capítulo II de este proyecto, de la cual se obtuvo el árbol lógico de fallas que se mostrara más adelante, y se describe a continuación.

4.3.1. Problema

El problema que motivó la realización del presente estudio lo constituyó la presencia de fallas críticas en la turbina, consideradas así por la interrupción del servicio prestado por la misma ante eventos indeseados, que conllevan a altos TPFS y por lo tanto, a baja disponibilidad y confiabilidad operacional; aspectos que perjudican la continuidad y condición operativa del activo, así como la imagen y credibilidad de la organización.

4.3.2. Modos de falla

Los modos de falla fueron representados por los distintos eventos o manifestaciones de fallas evaluados a su vez a través de la matriz de criticidad presentada en la sección anterior, de la cual se definió la falla de mayor criticidad, propiamente dicha, la cual consistió en la denominada “pérdida de aceleración y alta vibración en el eje de alta”.

4.3.3. Hipótesis y su validación

El modo de falla crítico, a su vez derivó dos posibles causas o hipótesis, siendo estas:

- Falla de vibración del eje de alta.
- Falla del rotor del eje de alta.

En cuanto a la falla por vibración del eje de alta, se procedió para su validación y/o evaluación con la revisión del historial de falla y registro de condiciones operacionales al momento del evento o paro crítico (Ver Anexo C), de lo que se obtuvo que los valores de vibración resultaron elevados con respecto al espectro permisible de operación, debido a que el rotor presentó desaceleración por ruptura de los álabes de la turbina de primera etapa, tobera de primera etapa y otras zonas (Fig. 4.2.), como consecuencia de la ruptura del tornillo de tierra de la pieza de transición, falla evidenciada a partir del reporte de inspección realizado por la sección de equipos dinámicos de la organización.

Se sabe que la ruptura de dichos elementos conlleva a que segmentos de los mismos permanezcan en movimiento dentro de la turbina, golpeando el entorno y generando inestabilidad en dicha sección del equipo, por lo que los sensores de vibración de dicha zona captaron estas perturbaciones en forma de ondas que son enviadas a través de señales al sistema de control del equipo, que neutralizan o suprimen la función de dicho componente.



Figura 4.2. Álabes rotos pertenecientes a la turbina a gas PGT5.

Fuente: Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose. (2009)

A continuación se muestra el árbol lógico de falla (Fig. 4.3), el cual muestra la estructura que se usó para identificar las raíces físicas, humanas y latentes que provocaron la falla.



Figura 4.3. Árbol lógico de fallas.

Fuente: propia. (2009)

Por su parte, en cuanto a la falla del rotor del eje de alta, como se describió anteriormente, se trató de la ruptura de álabes de la turbina, ocasionada por la rotura de un tornillo de cierre de la pieza de transición, como se aprecia en la Fig. 4.4.



Figura 4.4. Tornillo de cierre de la pieza de transición de la Turbina PGT5.

Fuente: Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose. (2009)

De lo anterior, se deduce que la hipótesis que se ajusta al origen de la falla crítica es la ruptura de un tornillo de cierre de la pieza de transición.

4.3.4. Causa raíz física

Como causa raíz física de la falla, se procedió a realizar investigaciones que condujeron como punto principal a la validación del material utilizado en la fabricación del tornillo fracturado de la pieza de transición, citado en la sección 4.3.3.

Dicho estudio consistió en la realización de una prueba no destructiva de composición química del material denominada Identificación Positiva de Material, en la cual fueron revelados los elementos que constituyen la aleación de la que se encuentra realizado dicho tornillo.

Al comparar los resultados de esta prueba con las especificaciones técnicas del fabricante de la turbina, pudo observarse divergencias en cuanto a la composición de las aleaciones, ya que el fabricante exige que el material sea una superaleación llamada Nimonic 75 y el tornillo que se encontró era un acero inoxidable martensítico.

A continuación se muestran los diferentes tornillos estudiados (Figs. 4.5 y 4.6) con las tablas (4.13 Y 4.14) correspondientes a la composición química de los mismos.



Figura 4.5. Muestra A Tornillo color plateado (PART NUMBERT: RVR20649).

Fuente: Planta de Fraccionamiento y despacho Jose (2008)

Tabla 4.13. Composición química de la muestra A según la Identificación Positiva de Materiales (PMI).

Composición química	(%)
Cr	11
Fe	84,68
Mo	1,15
Ti	0

Fuente: Planta de Fraccionamiento y despacho Jose (2008)

Según el análisis realizado a la composición química del tornillo encontrado en la pieza de transición se describe que el tipo de acero es un acero inoxidable martensítico.



Figura 4.6. Muestra B Tornillo color negro (PART NUMBERT RVU22079).

Fuente: Planta de Fraccionamiento y despacho Jose (2008)

Tabla 4.14. Composición química de la muestra B según la Identificación Positiva de Materiales (PMI)

Composición química	(%)
Ni	68
Fe	1,87
Cr	25,95
Ti	3,91

Fuente: Planta de Fraccionamiento y despacho Jose (2008)

Tipo de acero según análisis: **NIMONIC 75** (Acero aleado resistente a altas temperaturas considerada super-aleación).

Del resultado de la composición química, se concluye que la muestra **B** supera en calidad y condiciones de servicio (alta temperatura) a la muestra **A**, en otras palabras que el tornillo que se encontró en la turbina (muestra A) no tenía las propiedades necesarias para resistir las altas temperaturas a las que son sometidos por los gases calientes. En cambio la muestra B si posee dichas propiedades.

4.3.5. Causa raíz humana

Una de las razones por las cuales se incurre a fallas físicas como la que se indicó en la sección anterior se encuentra orientada al criterio de selección inadecuado por parte del equipo o mano de obra involucrada en el ensamble de la unidad, además del personal que participa en acciones de mantenimiento.

4.3.6. Causas raíces latentes

La causa raíz humana indicada anteriormente fue motivada por causas latentes tales como:

a) Disponibilidad de repuestos: a su vez es originada por retardos en procesos de procura y selección de stock de insumos para ensamble y/o repuestos.

b) Carencia y/o incumplimiento de procedimientos de trabajo: esta causa raíz es motivada por posible falta de supervisión de personal durante los procesos de instalación y/o ensamble, que permita velar el cumplimiento de procedimientos de trabajo; y en ocasiones a la inexistencia de un procedimiento seguro de trabajo para la realización de dicha labor, lo cual no garantiza que al momento del ensamble de la unidad se cuente con materiales y/o herramientas adecuadas.

c) Falta de adiestramiento del personal en el área: una de las raíces latentes fundamentales corresponde a la falta de adiestramiento y actualización del

personal, en cuanto a operación y mantenimiento del equipo considerado para el estudio, además de fundamentos en metalúrgia; todo esto permitirá al personal involucrado a poseer un criterio técnico adecuado para la toma de decisiones asertivas, una vez que se presenten las causas latentes anteriormente descritas.

4.4. Proposición de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5

Después de realizar el árbol lógico de fallas y analizar las raíces físicas, humanas y latentes, se procedió a la proposición de acciones para minimizar la ocurrencia de fallas y mejorar la disponibilidad de la turbina.

La realización e implantación de las acciones propuestas mejoraran y logran minimizar la ocurrencia de fallas tanto para la turbina estudiada como para las otras que se encuentran ubicadas en el área de estudio.

A continuación se proponen acciones para disminuir la ocurrencia de la falla crítica obtenida de este trabajo de investigación.

Tabla 4.15. Acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5

Item	Acciones	Responsable
1	Seguimiento a los procesos de procura de insumos y repuestos de la turbina.	Mantenimiento
2	Optimización de repuestos en inventario.	
3	Supervisión de personal que labora en acciones de mantenimiento y/o ensamblaje de la unidad.	Mantenimiento, SIAHO
4	Elaborar manuales que permitan el cumplimiento de procedimientos adecuados de trabajo.	Mantenimiento: supervisores, operadores y mantenedores
5	Adiestramiento del personal de los departamentos de operación y mantenimiento en las áreas de metalurgia y resistencia de materiales, así como en operación y mantenimiento de las turbinas en estudio.	Mantenimiento: supervisores

Fuente: propia. (2009)

Tabla 4.16. Continuación de acciones para la disminución de la ocurrencia de las fallas de la turbina a gas PGT5

Item	Acciones	Responsable
6	Hacer seguimiento de de la condición del equipo en la parte de vibración para predecir fallas potenciales.	Mantenimiento
7	Revisar el cumplimiento del programa de inspección predictiva, análisis electrónico, entre otros.	
8	Impulsar la creación de una sección para adiestrar al personal a los requerimientos del sistema. y a su vez llevar un registro de los eventos y componentes más críticos que enfrenta la turbina.	
9	Iniciar la presentación de proyectos y propuestas para la disminución de la dependencia de servicios externos.	Mantenimiento: supervisores, operadores y mantenedores
10	Implementar un programa de planificación para la obtención oportuna de repuestos previa a la aparición de fallas en activos para garantizar la disponibilidad de repuestos críticos.	Mantenimiento: supervisores

Fuente: propia. (2009)

Estas acciones deben enfocarse en función a la experiencia del personal competente y ser discutidas por el mismo a través de diversas dinámicas de grupo tales como: paneles, tormenta de ideas, entre otras; con el fin de delegar funciones y a su vez poder ejecutarlas con los departamentos correspondientes.

Con la implementación de las acciones propuestas se busca mejorar el comportamiento de la máquina, disminuir sus causas de ocurrencia de fallas, los altos tiempos fuera de servicio, dar mayor capacitación al personal de mantenimiento además de operadores para que ejecuten actividades de manera proactiva y se le dé mayor continuidad al proceso, minimizándose los peligros en planta para quienes allí laboran y para el medio ambiente.

CONCLUSIONES

En este segmento de cierre de la investigación se presentan las conclusiones logradas, en concordancia con los objetivos perseguidos.

- El contexto operacional sirvió de punto de partida para la investigación, al proporcionar información general en cuanto a función del activo, condiciones operacionales, frecuencias de mantenimiento y modificaciones del mismo.
- Del análisis de criticidad aplicado a la turbina PGT5 se obtuvo que la falla de mayor jerarquía o criticidad se denominó “pérdida de aceleración y alta vibración en eje de alta”.
- La criticidad de algunas de las fallas evaluadas presentaron impactos globales bajos o nivel de criticidad no crítico, debido a que según los estudios realizados estas no generaron impacto en seguridad y ambiente, o en su defecto, estos fueron de baja ponderación.
- La validación de las hipótesis planteadas en el árbol lógico de fallas orientó a la formulación de una nueva hipótesis, deduciéndose que la falla física crítica corresponde a la ruptura de un tornillo de cierre de la pieza de transición del eje de alta presión.
- Pruebas no destructivas del tornillo fracturado indicaron que el material utilizado para su fabricación consistió en un acero inoxidable martensítico, que diverge del material recomendado para los mismos por el fabricante, el cual se trata de un acero aleado resistente a altas temperaturas considerada superaleación denominado (NIMONIC 75), siendo el primero una aleación

con capacidad inferior para soportar las condiciones de servicio, con respecto al material recomendado por el fabricante.

- Las acciones y estrategias propuestas servirán de apoyo para la toma de decisiones en la planta de Fraccionamiento y Despacho Jose.

RECOMENDACIONES

Las sugerencias derivadas del proceso investigativo están orientadas a los niveles organizacionales de PDVSA GAS, a quienes le corresponderán tomar las decisiones pertinentes y oportunas respecto a los siguientes puntos:

- Implementar e incluir las acciones y estrategias propuestas en esta investigación con el fin de evitar y/o minimizar la ocurrencia de la falla crítica estudiada.
- Dar seguimiento a la aplicación de las metodologías de análisis de criticidad y análisis de causa raíz en el área de turbomáquinas con la finalidad de continuar con la mejora oportuna en el mantenimiento de los equipos.
- Evitar el uso de repuestos y piezas fuera de condiciones técnicas recomendadas por el fabricante.
- Prever la definición de políticas, planes y programas de mantenimiento y limpieza permanente a los turbocompresores ubicados en el área de refrigeración 380.
- Por último se recomienda continuar con la repotenciación en las otras turbinas que se encuentran en el área al igual a las pertenecientes a la planta de Extracción Santa Bárbara con la finalidad de elevar su eficiencia total.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M., Cabello. **“Análisis de Criticidad para equipos de la planta de Fraccionamiento Catalítico de la Refinería Puerto la Cruz (RPLC)”**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente (2006).

[2] M., González. **“Análisis de Fallas para cintas de corte empleadas en las maquinas de sierra tipo Horizontal. En esta investigación se realizó un análisis de fallas en el cordón de soldadura de las cintas de corte empleadas en las maquinas de sierra tipo horizontal”**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente (2004).

[3] J. J., López. **“Análisis de Fallas de los Alabes de Primera etapa del turbogenerador N° 7 MS-7001E General Electric de la Planta-Generadora de CADAFE-Guanta”**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente (2003).

[4] C., Jiménez y L., Carmona. **“Análisis de Criticidad y Evaluación Económica de los programas de mantenimientos de los equipos rotativos asignados al área de mantenimiento de la planta de extracción San Joaquín PDVSA GAS”**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente (2002).

[5] JM. L., Ching Q. **“Análisis de fallas y factibilidad de reemplazo posterior al mantenimiento mayor de motocompresores en plantas de gas en PDVSA, Distrito sur San Tome”**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente (2000).

[6] Lecuona, y J. I. Nogueira. **“Turbomáquinas. Proceso, análisis y tecnología”**, Editorial Ariel, S.A, 1ª Edición. Barcelona, España (2000).

[7] J., González. **“Taller de turbinas a gas PGT10 y PGT5”**, Instituto nacional de cooperación educativa. Monagas. (2005).

[8] SAWYERS GAS TURBINE ENGINEERING HANDBOOK, **“Theory & Design”**, Volumen 1 Gas Turbine Publications Inc. Stamford, Connecticut (1976).

[9] SUÁREZ, D. **“Mantenimiento Mecánico”**, Manual Teórico-Práctico de la Universidad de Oriente, Anzoátegui (2001).

[10] Confirma & Consultores. **“Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”**. Puerto la Cruz. Venezuela (2007).

[11] SUÁREZ, D. **“Críticidad de Equipos Utilizando la Metodología D.S.”** Universidad de Oriente. Venezuela (2005).

[12] **“Solución de Problemas a Partir del Uso de Herramientas del Análisis Causa Raíz (ACR)”**, Taller Instrucción ACR, PDVSA INTEVEP, (2004).

[13] Universidad de Salamanca. **“Enciclopedias Visor”**. Plaza & Janes Editores, España, (1999)

[14] ANIORTE N. **“Análisis Epistemológico”**, México (2008).

[15] SGS. **“Identificación positiva de materiales”**. Peru. (2009)

[16] HOFFMAN, E. **“Fundamentals of tool Design, 2nd ed., Society of manufacturing engineers”**, England (1984).

1. R. Huerta Mendoza **“El Análisis de Criticidad, una Metodología para Mejorar la Confiabilidad Operacional”**. Club de Mantenimiento (2003).
2. E. Avallone, **“Manual del Ingeniero Mecánico”**, Novena Edición, Editorial McGraw-Hill, México, Tomo II, (2001).
3. R. J., Zawoysky y K. C., Tornroos **“GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options”** GE Power Systems (2001).
4. C. Torres **“Manual de servicio Turbinas de Gas para servicio pesado MS-5000”**, Meneven S.A. Planta de Fraccionamiento Jose (1994).
5. Balestrine M, **“Como Elaborar un Proyecto de Investigación”**, Consultores Asociados, España, (1998).

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

TÍTULO	ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DE UNA TURBINA A GAS Caso: Nuovo Pignone modelo PGT5 del turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
López A.I, Manuel de J.	CVLAC: 16.063.026 EMAIL: Manny_Scorpion@Hotmail.Com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES

Análisis de Criticidad

Mantenimiento

Nuovo Pignone

Turbina a Gas

Análisis Causa Raíz

Turbomáquinas

PMI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo consistió en el desarrollo del Análisis Causa Raíz a la turbina a gas marca Nuovo Pignone, modelo PGT5 del Turbocompresor D4-81001 de la Planta de Fraccionamiento y Despacho Jose, con el fin de encontrar las raíces físicas, humanas y latentes que indujeron a la falla crítica. Para el logro de este objetivo se describió el contexto operacional del equipo para diagnosticar los parámetros de funcionamiento y de diseño de la turbina a gas. Seguidamente se realizó un Análisis de Criticidad para identificar los modos de falla más críticos que tienen lugar en el equipo; se procedió a realizar el Análisis Causa Raíz propiamente dicho, estructurado por un Árbol Lógico de Fallas basado en la información obtenida de entrevistas no estructuradas al personal operativo; las hipótesis obtenidas fueron validadas mediante una exhaustiva investigación que incluyó la revisión de registros de fallas y la realización de una prueba no destructiva de materiales (PMI), deduciéndose como raíz física de la falla crítica, a la desviación en la selección del material constituyente del tornillo de cierre de la pieza de transición del eje de alta presión de la turbina, derivándose de este hecho las acciones pertinentes para minimizar la ocurrencia de dicho evento.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS X	TU	JU
Camargo S., Lino A.	CVLAC:	11.496.426			
	E_MAIL	lcamargos@cantv.net			
	E_MAIL				
Blanca, Carlos	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	Blancac@PDVSA.com			
	E_MAIL				
Rodriguez, Edgar	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Villarroel, Delia	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	10	23
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Análisis causa raíz turbina a gas.doc	Application/msword

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

ALCANCE

ESPACIAL: Dpto.mantmayor/Jose (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/ Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

AUTOR

AUTOR

AUTOR

López A., Manuel de J.

TUTOR

JURADO

JURADO

Camargo, Lino A.

Rodríguez, Edgar

Villarroel, Delia

Villarroel, Delia

POR LA SUBCOMISION DE TESIS