

**ANÁLISIS Y DESARROLLO DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA Y SUS
EFECTOS PARA INSTRUMENTACIÓN EN TURBOCOMPRESORES**

**EDWIN ARTURO MENDOZA BAÑOS
RODRIGO ACERO BECERRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**ANÁLISIS Y DESARROLLO DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA Y SUS
EFECTOS PARA INSTRUMENTACIÓN EN TURBOCOMPRESORE**

**EDWIN ARTURO MENDOZA BAÑOS
RODRIGO ACERO BECERRA**

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

**Director: EDILBERTO PINTO CORZO
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

A Dios, a mi madre Zobeida Baños por sus principios y valores que hicieron de mí una persona de bien.

A mi hijo y mi esposa por su entendimiento y tolerancia para entender este importante paso en mi vida.

Se agradece a muchas personas que quiero resaltar por el apoyo y confianza que me brindaron para lograr nuestra meta personal y profesional.

Al Ingeniero Edilberto Pinto Corzo por creer en la capacidad de las personas y apoyar a mi desarrollo profesional como director de proyecto.

Al Ingeniero Martín Caro, por el apoyo para crear el espacio y la aprobación de Wood Group para realizar la especialización.

A mi compañero de trabajo, Rafael Espinosa, por su apoyo y sacrificio en nuestro sitio de trabajo, en muchas ocasiones para realizar mis estudios.

Edwin Arturo Mendoza Baños

DEDICATORIA

Hace dos años comencé una nueva etapa y un nuevo reto en mi vida. Hoy siento una gran nostalgia al dejar la especialización pues a lo largo de ese tiempo fueron muchas las anécdotas que pasamos, tanto tristes como alegres, pero al tiempo siento gran alegría y felicidad por haber alcanzado una meta y haber escalado un peldaño mas en mi vida, por eso quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron y aportaron un granito de arena para que esto saliera adelante.

Mis Agradecimientos a:

A mis padres que gracias a sus valores, principios y consejos me dieron una buena crianza para alcanzar las metas.

A mis Hijos y esposa por estar a mi lado y apoyarme incondicionalmente en todo momento.

A todos mis compañeros de estudio por su colaboración.

A los profesores que a lo largo de la carrera nos apoyaron, aportaron sus conocimientos y experiencias.

A la universidad que contó con la infraestructura adecuada para cursar la carrera y las personas que laboran en ella ya que nos colaboraron cuando lo necesitamos.

Al Jefe de escuela, Director y Codirector del proyecto por guiarnos en el desarrollo del proyecto.

Muchas gracias a todos los llevaré en mi mente.

Que DIOS los bendiga

Rodrigo Acero Becerra

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1 OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA L INSTRUMENTACIÓN DE LOS TURBOCOMPRESORES.	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo General.	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 JUSTIFICACION	21
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 TECNICA DEL FMECA (ANALISIS DE CRITICIDAD LOS MODOS DE FALLAS Y SUS EFECTOS)	23
2.1.1 Alcance de la Técnica FMECA.	24
2.1.2 Aplicación del Estándar	25
2.1.3 Definiciones	25
2.1.4 Requerimientos Generales	26
2.1.5 Ventajas	27
2.1.6 Desventajas	27
2.1.7 Áreas de Aplicación	28
2.2 INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO	28
2.2.1 Confiabilidad	28

	Pág.
2.2.2 Disponibilidad	30
3. TURBOCOMPRESORES	33
3.1 GENERALIDADES	33
3.2 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN	34
3.3 CICLO BRAYTON	36
3.4 COMPRESORES CENTRÍFUGOS	37
4. ESTRUCTURA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	40
4.1 REQUERIMIENTOS	40
4.2 TAXONOMIA DE LA INSTRUMENTACION DEL TURBOCOMPRESOR	41
4.2.1 Lógica Narrativa de los Subsistemas.	43
4.2.1.1 Subsistema de Aceite Hidráulico	43
4.2.1.2 Subsistema de Aceite de Lubricación	45
4.2.1.3 Subsistema de Aceite de Control	47
4.2.1.4 Subsistema de Fuel Gas	49
4.2.1.5 Subsistema de Arranque	49
4.2.1.6 Subsistema de Exhosto	50
4.2.2.7 Sistema de Protección de Velocidad y Vibración	54
4.2.2.8 Sistema de Enfriamiento y Ventilación	59
4.2.2.9 Sistema de Fire & Gas	60
4.2.2.10 Sistema de Enfriamiento de Turbina	62
5. METODOLOGIA	63

	Pág.
5.1 Definición De Los Sistemas	64
5.2 REGLAS BASICAS & SUPUESTOS	66
5.3 DIAGRAMAS DE BLOQUE	66
5.4 IDENTIFICACION DE LOS MODOS DE FALLA	68
5.5 ANALISIS DE LOS EFECTOS DE FALLA	69
5.6 COMPENSACION DE PROVISIONAMIENTO	69
5.7 EVALUACION DE LA SEVERIDAD	70
5.8 RESULTADOS DEL FMEA	73
5.9 ANALISIS DE LA CRITICIDAD	73
5.10 ANALISIS CUANTITATIVO	75
5.11 FACTOR DE DETECCION	77
5.12 CALCULO DE LA CRITICIDAD	78
5.13 RANKING DE LA CRITICALIDAD	78
5.14 RESULTADOS DEL FMECA	79
5.15 FORMATO DEL FMECA	79
6. DESARROLLO DEL FMECA	81
7. CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFIA	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proyección de curva de disponibilidad en el tiempo	32
Figura 2. Corte transversal de una turbina	33
Figura 3. Curva de arranque típico de una Turbina 5002C	36
Figura 4. Vista lateral de una turbina modelo 5002C.	36
Figura 5. Ciclo de Bryton (Encendido de una turbina)	37
Figura 6. Corte Transversal compresor centrifugo	38
Figura 7. Mapa de caracterización de un compresor centrifugo	39
Figura 8. Análisis de la disponibilidad de los turbocompresores en instrumentación	40
Figura 9. Taxonomía según la ISO-14224	42
Figura 10: Taxonomía del Turbocompresor ubicado en la planta de Cupiagua	43
Figura 11: Pasos para desarrollar un FMECA	64
Figura 12. Árbol para definición de Taxonomía en el Turbocompresor	65
Figura 13. Diagramas de Bloque No 1	67
Figura 14. Diagramas de Bloque No 2	70
Figura 15. Diagrama de bloques análisis de la criticidad (Método Cualitativo)	74
Figura 16. Figura del Formato del FMECA	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Disponibilidad Turbocompresores de un semestre	31
Tabla 2. Control de Disponibilidad real periodo de dos años y medio	31
Tabla 3. Evaluación de la Severidad	71
Tabla 4. Análisis de la probabilidad	72
Tabla 5. Definición de la Ocurrencia	76
Tabla 6. Definición del Ranking de Severidad	77
Tabla 7. Definición factor de detección	78

GLOSARIO

MTTR: Tiempo medio entre fallas.

MTBF: Tiempo medio entre reparación.

ALARMAS: Evento que se produce en sistemas de control y monitoreo de equipos complejos, el cual permite una hipótesis que debe ser validada por un experto o ingeniero conocedor del área en particular.

Causa de falla: Las circunstancias durante el diseño, fabricación o uso que se ha convertido en una falla. La identificación de las causas de una falla normalmente requiere una investigación más profunda para cubrir errores humanos, factores organizacionales, así como la causa técnica.

Clase de equipo: Son equipos de una misma característica y función. Ejemplo: bombas.

Confiabilidad: La habilidad de un ítem para desempeñar una función requerida bajo unas condiciones dadas en un intervalo dado.

Criticalidad: Gravedad de la reparación en términos de tiempo y criticidad del equipo.

Criticidad: Grado de importancia de un equipo, sistema o proceso dentro de un ambiente específico.

Dato: Documento, testimonio. Antecedente necesario para llegar al conocimiento exacto de una cosa.

Datos estadísticos: Datos tomados para fines estadísticos. Sirven como indicadores o guías.

Defecto: El estado de un ítem caracterizado por su inhabilidad para desempeñar una función requerida. Excluye la inhabilidad durante el mantenimiento preventivo u otras acciones planeadas o debido a la falta de recursos externos.

Descripción de la falla: La aparente causa observada de una falla. Normalmente reportada en el sistema de administración de mantenimiento.

ISO: International Organization for Standardization.

EXPERTO: Personal que posee el conocimiento de un tema en particular, el cual aporta conocimiento para estructurar la base del conocimiento.

Disponibilidad: La habilidad de un ítem de permanecer desempeñando una función requerida bajo unas condiciones dadas a un instante de tiempo, o sobre un intervalo dado asumiendo que le son suministrados todos los recursos externos.

Falla crítica: Falla de un equipo unitario que causa una inmediata cesación de su habilidad para desempeñar la función requerida.

Falla no crítica: Una falla de un equipo unitario que no causa una cesación inmediata de la habilidad de desempeñar su función requerida.

Falla: La terminación de la habilidad de un ítem para desempeñar una función requerida.

Función requerida: Una función o una combinación de funciones de un ítem el cual es considerado necesario suministrar a un servicio dado.

Horas hombre de mantenimiento: La duración acumulada de los tiempos individuales de mantenimiento expresado en horas, usado por todo el personal de mantenimiento para una acción de un tipo de mantenimiento, o sobre un intervalo dado.

Información: Conocimiento, Educación, instrucción.

Ítem mantenible: Un ítem que constituye una parte o un conjunto de partes que son normalmente el nivel más bajo durante el mantenimiento.

Mantenimiento correctivo: Es el mantenimiento llevado a cabo después de reconocer una falla e intenta colocar el ítem en un estado dentro del cual pueda desempeñar su función requerida.

Mantenimiento preventivo: El mantenimiento llevado a cabo a determinados intervalos o de acuerdo con algún criterio prescrito e intenta reducir la probabilidad de falla o degradación del funcionamiento de un ítem.

Mantenimiento: La combinación de todas las acciones administrativas y técnicas, incluyendo acciones de Supervisión, dirigidas a conservar un ítem o a restaurarlo al estado en que pueda desempeñar su función requerida.

Mecanismo de falla: Proceso El físico, químico u otro que se ha convertido en una falla.

RESUMEN

Título: **DESARROLLO DE ANALISIS DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS PARA INSTRUMENTACION EN TURBOCOMPRESORES***

Autores: **EDWIN ARTURO MENDOZA BAÑOS Y RODRIGO ACERO****

Palabras Claves: Función, Modo de Falla, Evaluación de Criticidad, Jerarquía

Línea de Investigación: APLICACIÓN DE INGENIERIA DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento a través de los años ha evolucionado, su propósito hacer del mantenimiento una inversión y no un costo. Es por eso que la Ingeniería de Mantenimiento se es importante en el mundo moderno donde el desarrollo tecnológico de los equipos, crea la necesidad de crear técnicas avanzadas que pueden ser aplicadas en diferentes industrias.

Dependiendo de la industria o proceso se han desarrollado técnicas o estándares para jerarquizar los equipos el cual son considerados críticos para la operación. La necesidad de mantener la Disponibilidad y Confiabilidad de los equipos ha hecho, que técnicas utilizadas exclusivamente en la industria militar haya trascendido en otras industrias. Entre las técnicas están el FMEA, FMECA, FMEDA.

Posteriormente no solo bastaba con mantener la confiabilidad de los equipos, factores como la reducción de costos, la competitividad entre las empresas, la prestación de servicios con estándares mundiales hacen que las empresas necesiten desarrollar e innovar para poder estar en un mercado sostenible y que el mantenimiento se considere como una inversión para los activos de las empresas.

Los turbocompresores son maquinas que tienen una criticidad y criticidad alta por lo tanto consideramos que desarrollar un FMECA a estos equipos ayudará a mejorar su confiabilidad como resultado de aplicar tareas de mantenimiento correctivo y preventivo.

Como todo proceso este debe ser valorado en un periodo de tiempo prudente con el objetivo de determinar la efectividad de las recomendaciones e implementaciones realizadas.

Por último para tener el complemento ideal, la Seguridad de los procesos entra como una necesidad fundamental por el cual debe ser aplicado el mantenimiento como una Metodología para evitar que se presenten accidentes mayores en la industria.

* Monografía de Grado

** Facultada de Ingeniería Mecánica: Director Ing. Edilberto Pinto Corzo

SUMMARY

Title: **ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF CRITICALITY ANALYSIS OF FAILURE MODES AND EFFECTS FOR IMPLEMENTATION IN TURBOCHARGERS ***

Authors: **EDWIN ARTURO MENDOZA BAÑOS Y RODRIGO ACERO****

Keywords: Function, Failure Mode, Assessment of Severity, Hierarchy
Research Line of Investigation: APPLICATION OF MAINTENANCE ENGINEERING

Maintenance through the years has evolved with the purpose of maintaining an investment not a cost. That's why the charges Maintenance Engineering strength in the modern world where technological development of equipment creates the need to develop advanced techniques that can be applied in different industries.

On base the industry or process or standard techniques have been developed to rank the teams which are considered critical for the operation. The need to maintain the availability and reliability of equipment has made techniques used exclusively in the defense industry has transcended to other industries. The techniques are the FMEA, FMECA, DMEA.

Its not enough to maintain the reliability of equipment, factors such as cost reduction, competitiveness between companies, providing service to world class standards means that companies need to develop and innovate in order to be in a sustainable market and the maintenance was seen as an investment asset companies. Turbochargers are machines that have a high criticality and therefore we believe that developing a FMECA to this equipment will help improve its reliability as a result of applying corrective and preventive maintenance.

As with any process that must be considered as a prudent period of time in order to determine the effectiveness of the recommendations and implementations made.

Finally in order to reach ideal concept, the safety jump processes as a basic need which must be applied to maintenance as a methodology to prevent major accidents occur in the industry.

* Monograph of Degree. Maintenance of Management Specialist

** Mechanical School Engineering. The Director Ing. Edilberto Pinto Corzo

INTRODUCCIÓN

La evolución del ser humano está presente hacia todos los niveles por lo tanto mantenimiento no es la excepción el cual maximizar los recursos, optimizar los costos y minimizar los gastos, es el objetivo para ser más competitivo en el mercado. Igualmente con este mismo desarrollo, la aparición de nuevas técnicas y nuevas metodologías busca cambiar el concepto de mantenimiento en aras que se vea como una inversión y no un gasto.

El FMECA una herramienta desarrollada inicialmente para garantizar la confiabilidad de los equipos en el ejercito de los Estados Unidos hoy día es utilizada como una herramienta para la para la toma de decisiones que depende de la aplicación en el proceso o equipos a ser utilizados. La oportunidad es tal vez el factor más importante indiferente de la efectividad de la implementación. Siendo el resultado regularmente el esperado según los objetivos mínimos establecidos.

Aunque el FMECA busca desarrollar y aplicar actividades que garanticen la confiabilidad; esta puede ser usada para otros propósitos como establecer la mantenibilidad de los equipos, análisis del impacto en seguridad de los procesos, desarrollo e implementación del plan de mantenimiento y para establecer las acciones en caso de fallas. Estos puntos deben ser considerados en la planeación del FMECA para evitar el duplicar esfuerzos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta la importancia que tiene la industria petrolera en Colombia y su visión hacia el futuro, necesita de organizaciones que preste un servicio integral para suplir sus necesidades, es por ello que cuenta con organizaciones en la industria del petróleo como Wood Group dedicada a proporcionar a sus clientes certificados de calidad de operación y mantenimiento de sus equipos y suministros industriales en especial los turbocompresores.

En la estructura de la compañía se cuenta con el departamento de instrumentación y control el cual tiene a su cargo el buen funcionamiento y mantenimiento de los turbocompresores. Basándose en el desarrollo de estrategias de mantenimiento y la experiencia de todo el personal de trabajo que ha interactuado con los equipos cuando han tenido fallas en sus diferentes sistemas. Este tipo de fallas generan impacto directo en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos el cual afectan directamente los indicadores y la eficiencia de planta.

Con base a esta premisa como la de mayor peso y el tiempo que lleva el equipo en operación se ha considerado la necesidad de realizar un análisis de la criticidad de los modos de fallas de la instrumentación asociada al turbocompresor.

El resultado de este análisis es la base para la implementación de una nueva estrategia de mantenimiento que facilite la planificación de las actividades de mantenimiento en busca de mejorar la eficiencia y confiabilidad.

Se propone el desarrollo de un FMECA para los TURBOCOMPRESORES con base a un estándar definido. Dicho análisis servirá como base para la toma de decisiones en la implementación de las rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo para el turbo grupo.

1.1 OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE LOS TURBOCOMPRESORES.

Actualmente la instrumentación de los turbocompresores tiene definido una estrategia de mantenimiento con base a las recomendaciones iniciales del fabricante y la experiencia de los especialistas de disciplina, el cual ha tenido

diferentes cambios con base a algunas evaluaciones mas en función en optimizar los costos de mantenimiento y reducir las horas hombre para la estrategia.

A pesar de que la data de falla de la instrumentación es baja. Con base al ciclo de vida útil de los componentes se crea la necesidad de realizar una nueva valoración de la estrategia actual de tal manera que aquellos instrumentos que estén cercanos a presentar algún tipo de falla se puede remediar con la nueva estrategia de mantenimiento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General. El objetivo principal es desarrollar la Metodología FMECA para identificación los modos de falla su criticidad y acciones a tomar aplicado a los turbocompresores, sin importar el tipo o modelo. Es contar con el diseño de un herramienta eficaz, para apoyar a los responsables del sistema de los turbocompresores a la identificación de fallas y solución de las mismas, que con su implementación permita establecer acciones oportunas de control, actualización de información y divulgación de eventos relacionados con las fallas que se han presentado y que puedan llegar a ocurrir; permitiendo la toma de decisiones con eficiencia, el manejo de procedimientos que involucran las fallas, para que así se lleve a cabo gestión de todo tipo, lo que servirá de referencia para no recaer en los mismos errores.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Desarrollar el estudio con base a la técnica o Metodología de FMECA a la instrumentación asociada a los turbocompresores y equipos auxiliares.
- ❖ Preparar a todo el personal que interactuará con la herramienta de tal manera que cuente con los conocimientos básicos y adecuados para desarrollar el proyecto
- ❖ Proporcionar a los ingenieros, técnicos y supervisores de los turbocompresores una herramienta que ayude a implementar la estrategia de mantenimiento para instrumentación y control.
- ❖ Desarrollar los procedimientos específicos para los modos de falla con el objetivo de garantizar una atención oportuna a los turbocompresores.

1.3 JUSTIFICACION

El desarrollo de este prototipo permite a las organizaciones de la industria petrolera disminuir los altos impactos de producción que representa tener un turbo grupo fuera de línea. Algunas metas establecidas no se han podido lograr, debido a estos impactos. Esto representa para las empresas reputación ante el cliente, costos de mantenimiento, horas hombre y confiabilidad en los turbocompresores.

Las organizaciones hoy día manejan dos técnicas para medir el desempeño de los turbo grupos. El MTBF (Mean Time between Failure) y MTTR (Mean Time to Repair). Estas herramientas buscan disminuir los tiempos establecidos en cada reparación y disminuir los tiempos entre fallas del turbo grupo.

Debido a la misma complejidad y arquitectura de las maquinas se presentan eventos que producen pérdidas de tiempo en el arranque y por consiguiente perdidas de producción. Este es un indicador importante para el desempeño y el servicio que prestan las compañías en el manejo de eficiencia de los turbocompresores, por lo tanto es de vital importancia contar con nuevas técnicas que permitan garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

La necesidad que se presenta de disponer de forma eficaz y confiable cada una de las fallas con sus múltiples especificaciones que han ocurrido durante un tiempo y organizar en forma sistémica la experiencia del personal de trabajo que han interactuado en el sistema el cual lo conocen a la perfección, además este proyecto no solo ayuda al fortalecimiento de los equipos de trabajo, si no para el mejoramiento de la gestión de procedimientos fundamentales para la toma de decisiones.

2. MARCO TEÓRICO

Actualmente las empresas con altos estándares cuentan con un sistema de gestión integral, estructurado de acuerdo con los requerimientos de la norma internacional ISO 9001, manejando una alta calidad de su servicio. Al querer seguir manteniendo los niveles de excelencia se plantea una solicitud por medio del personal del área de instrumentación para mejorar los procesos de arranque, parada y solución de fallas en los turbocompresores. Se establece un alcance para turbocompresores, donde se evaluarán los 10 sistemas que representan un alto impacto en el desempeño del turbo grupo.

Debido a la cantidad de información con la que se cuenta, pero que no se tiene centralizada y básicamente se accede a ella a través de archivos planos, no resulta nada sencillo tomar decisiones rápidas y efectivas basadas en múltiples parámetros dispuestos por las estrategias que ya se están establecidas. La identificación de fallas en equipos rotativos demanda un alto conocimiento de personal especializado, por lo tanto al poder plantear la implementación de una técnica que ayude a tomar acciones preventivas y correctivas de manera sistemática y así evitar no contar con la disponibilidad del equipo.

La solución de fallas en los arranques, paradas no planeadas de los turbocompresores es realizada basado en los conocimientos de un grupo de personas que han sido entrenadas en dichos equipos. Debido al impacto que representa tener un turbo grupo fuera de línea, en el momento de una falla se acude a dicho personal el cual basados en sus conocimientos adquiridos y los entrenamientos, evalúan las fallas y emiten la solución del problema.

Debido a la complejidad de los sistemas formados por el turbo grupo y cuando las soluciones no son acertadas se evalúan las diferentes hipótesis, el cual son validadas por el grupo, pero no de forma sistemática y estructurada para llegar a la solución mas acertada de manera eficaz y rápida.

Igualmente el conocimiento adquirido en la solución de una falla, solo queda para el grupo de expertos que solucionaron el problema en el momento. Muchas de estas experiencias no son difundidas de manera adecuada a todos los grupos que interactúan directamente con el turbo grupo.

Los reportes de falla generados en cada uno de los eventos, es guardado en archivos. Dichos reportes contienen información de las hipótesis planteadas, la comprobación de cada una de las hipótesis, la solución del problema y las recomendaciones para evitar la recurrencia de la falla. Estos archivos debido a su misma naturaleza, solo quedan como archivos de consulta como histórico del evento ocurrido en el turbo grupo, el cual es información valiosa que puede ser estructurada digitalmente y usada para la solución de eventos similares.

2.1 TECNICA DEL FMECA (ANALISIS DE CRITICIDAD LOS MODOS DE FALLAS Y SUS EFECTOS)

EL FMECA originalmente fue desarrollado por la aeronáutica nacional y la Administración del Espacio (NASA) para mejorar y verificar la confiabilidad del Hardware de los programas espaciales. Posteriormente el desarrollo fue llevado a su más alto nivel cuando la industria militar lo desarrolló como un estándar el cual fue evaluado y documentado. El estándar militar fue cancelado posteriormente pero este fue adaptado a las industrias e ingenierías aplicadas como a eléctrica y mecánica.

Análisis de Criticidad de los Modos de Fallo y sus Efectos (FMECA) es un herramienta esencial utilizada para valorar los modos de falla, lo efectos en un equipo, proceso o función que puede ser utilizada desde el concepto de diseño hasta la operación. El grado de esfuerzo y la sofisticación de enfoque utilizados en el FMECA dependerá de la naturaleza y requisitos de el programa o proyecto a realizar. Para ello se hace necesario adaptar los requisitos para un FMECA para cada programa. La Adaptación exige que, independientemente del grado de sofisticación, el FMECA deba contribuir significativamente a la optimización de los procesos, los programas de mantenimiento y la confiabilidad de los equipos.

Ejecutado correctamente FMECA es muy valiosa a los que son responsables de la toma de decisiones del programa con respecto a la viabilidad y pertinencia del enfoque de la mantenibilidad de los equipos.

El FMECA identifica puntos particulares de falla que requieren acciones correctivas, utilizando métodos de prueba y técnicas de identificación de fallas, suministrando un fundamento de la confiabilidad cualitativa, mantenibilidad, seguridad y análisis logístico. Evalúa la estimación de la rata de falla de los sistemas críticos definiendo un ranking de los modos de fallas de los sistemas, subsistemas dependiendo de su importancia e identifica partes que puedan llegar a falla.

La utilidad de la FMECA como una herramienta en la toma de decisiones depende de la eficacia con que la información problema se recolecta y se estructura.

Si bien el objetivo de un FMECA es identificar todos los modos de fallo dentro de un diseño del sistema, su primer objetivo es la identificación precoz de todas las catastrófica y crítica las posibilidades de fracaso para que puedan ser eliminados o minimizados a través de diseño de corrección lo antes posible. Por lo tanto, el FMECA debe iniciarse tan pronto como la información esté disponible en los niveles más altos del sistema y se extendió a los niveles más bajos a medida que más información disponible sobre los subsistemas, equipos y componentes o elementos asociados. Aunque el FMECA es una tarea esencial que busca fiabilidad, también proporciona información para otros fines. El uso de la FMECA se utiliza en Mantenimiento, análisis de seguridad, supervivencia, vulnerabilidad, análisis de apoyo logístico, el análisis del plan de mantenimiento el cual será nuestro enfoque en este proyecto.

La oportunidad de un FMECA de aplicar esta herramienta para la toma de decisiones depende de la aplicación en el proceso o equipos a ser utilizados. La oportunidad es tal vez el factor más importante indiferente de la efectividad de la implementación. Aunque el resultado regularmente es el esperado según los objetivos mínimos esperados.

Para el inicio de un FMECA es de suma importancia obtener la información disponible de los equipos establecidos en las fronteras desde el nivel general al nivel detallado para el logro de una aplicación solida de cada paso. Aunque el FMECA busca finalmente desarrollar y aplicar actividades que garanticen la confiabilidad; esta puede ser usada para otros propósitos como establecer la mantenibilidad de los equipos, análisis del impacto en seguridad de los procesos, desarrollo e implementación del plan de mantenimiento y para establecer las acciones en caso de fallas. Estos puntos deben ser considerados en la planeación del FMECA para evitar el duplicar esfuerzos.

2.1.1 Alcance de la Técnica FMECA. Este estándar establece los requerimientos y procedimientos para evaluar los modos de falla, los efectos y un análisis de la criticalidad para evaluar y documentar sistemáticamente. Un análisis del modo de falla de un componente (Instrumentos asociados al Turbocompresor) cómo impacta su función, a las personas, el desempeño del sistema, La confiabilidad y los requerimientos de mantenimiento. Cada falla potencial es evaluada en una matriz de criticidad con base a los efectos con el propósito de establecer las acciones correctivas o preventivas para que el equipo o componente no falle. Es decir minimizar al máximo estas fallas y controlar el riesgo que puede producir a los procesos, las personas o medio ambiente.

2.1.2 Aplicación del Estándar. El estándar puede ser aplicado para los sistemas o equipos que van a ser diseñados donde primariamente es evaluado por el desarrollo de la ingeniería con actividades de demostración o simulación o pruebas. El estándar también puede ser aplicado durante el proceso de producción del sistema o equipo para evaluar el diseño con el objetivo de mejorarlo con modificaciones.

Las tareas o actividades contenidas en el FMECA puede ser aplicado a todos los componente de un equipo. Este estándar no aplica para Software.

2.1.3 Definiciones

Acción Correctiva: Un documento diseñado, proceso o cambio de procedimiento que es implementado para y validado para corregir una causa de una falla o deficiencia.

Criticalidad: Una medida relativa de la consecuencia de un modo de falla y la frecuencia con que este evento ocurre.

Análisis de Criticalidad: Un procedimiento en el cual cada modo de falla potencial es clasificado de acuerdo a la valoración de la severidad y probabilidad de ocurrencia.

Severidad: La consecuencia del modo de falla. La severidad considera la peor consecuencia potencial de la falla, determinada por el grado de lesiones a las personas, daños de los activos, pérdidas en la producción o seguridad de los procesos.

Efectos del Daño: Los resultados o Consecuencias de los daños que tienen sobre la función. Estos son clasificados en Efectos de Daño Primario y Efectos de Daño Secundario.

Efecto del Daño Primario: Los resultados o consecuencias directamente causadas por la interacción del modo de daño con el sistema, subsistema o componente.

Efecto de Daño Secundarios: Los resultados o consecuencias indirectamente causadas por la interacción del modo de daño con el sistema, subsistema o componente.

Modos de Daño: La manera por el cual el daño es observado, generalmente describe la forma como el daño ocurre.

Mecanismo de Detección: El medio o método por el cual una falla puede ser descubierta por un operador cuando las condiciones de los sistemas están

normales o puede ser descubierta por el personal de mantenimiento con las acciones de mantenimiento o diagnóstico.

Ambiente: La condición o circunstancia, influencia o combinación de las mismas que afectan el sistema o los equipos durante su instalación u operación o condición de funcionalidad.

Causa de la Falla: El proceso físico o químico, defecto de diseño, calificación del defecto el cual son la razones básicas para que el equipo falle o en el cual inicia un proceso físico el cual produce el deterioro o falla del mismo.

Efecto de Falla: La consecuencia o consecuencias de los modos de falla que se tiene del sistema, equipo o componente.

Modo de Falla: La forma en el cual la falla es observada. Generalmente describe la forma como la falla ocurre y el impacto en la operación del equipo.

Análisis de los Modos de Falla y sus Efectos: Un procedimiento por el cual cada modo de falla potencial de un sistema, equipo o componente es analizado para determinar el resultado de los efectos del sistema y para clasificar cada falla potencial de acuerdo con la severidad.

Criticidad de los modos de fallas y sus efectos: Un procedimiento en el cual cada falla potencial es analizada para determinar como esta falla es detectada y las acciones a tomar para reparar esta falla.

FMECA: Un procedimiento por el cual un modo de falla de potencial en un sistema es analizado para determinar los resultados de los efectos el cual es clasificado según la falla potencial de acuerdo a la severidad.

Falla Oculta: Un modo de falla postulada en un FMEA por el cual no hay detección de una falla aunque se presenta una consecuencia.

2.1.4 Requerimientos Generales. Un modo de falla, efectos y análisis de criticidad (FMECA) puede ser planeado y realizado en acuerdo con los requerimientos generales del estándar y las tareas especificadas en los resultados. La Implementación del FMECA podrá ser iniciado tempranamente en las fases de diseño y establecer las acciones correctivas básicas prioritarias para asegurar la estabilización del sistema o equipo. El FMECA es realizado en dos pasos.

- Análisis de los modos de fallas y sus efectos (Failure Mode and Effects Análisis)
- Análisis de la criticidad (Análisis de Criticidad)

Para el logro éxitos del proyecto el trabajo de planeación del FMECA necesita procedimientos para implementación de los requerimientos especificados del estándar como una guía para establecer la implementación.

Se deben definir los formatos el cual organizan la estructura y la documentación del FMECA el cual es utilizado para documentar el ejercicio y poder desarrollar el análisis cuantitativo y cualitativo. Cada Elemento o ítem mantenible puede ser documentado adicionalmente en una hoja de FMECA que es contenido en el formato estándar aplicando la metodología.

2.1.5 Ventajas. El objetivo del FMECA es identificar todos los modos de fallas en el diseño u operación temprana. No implica que la metodología se pueda aplicar a los procesos o sistemas en operación. El primer propósito fundamental es identificar las posibles fallas catastróficas o críticas, teniendo en cuenta que debe aplicarse al sistema sin obviar ningún equipo o componente.

EL FMECA puede suministrar una línea base o una herramienta para Identificación de fallas para ser utilizada para tomar acciones correctivas para una falla dada. Esta misma información puede ser utilizada para varias otras herramientas de análisis como análisis de árbol de fallas o Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

El Análisis de arboles de falla es una herramienta para identificar múltiples puntos de falla, mas que una condición para tomar lugar para cuando una falla particular ocurre. Este análisis es típicamente conducido sobre áreas que puedan causar serios daños o accidente mayores o pérdidas humanas.

El análisis de RCM es un proceso que es utilizado para identificar acciones de mantenimiento que pueden reducir la probabilidad de falla y disminuir el costo en mantenimiento. Esto incluye utilizar equipos de monitoreo para predecir las fallas de algunos equipos y permitir que otros equipos corran a falla.

2.1.6 Desventajas. El FMECA solo se centra en los sistemas, subsistemas y componentes críticos. Esto puede enmascarar en ocasiones las fallas menores que si no se les da el tratamiento adecuado puede desencadenarse en una falla mayor.

Se hace necesario tener conceptos claros sobre la criticidad de los equipos para evitar este tipo de eventos.

Los FMECA se pueden aplicar en la fase temprana como el diseño o inicio de la operación de los equipos. Si la evaluación no se realiza con los conceptos de expertos puede que los resultados u objetivos de minimizar los impactos no sea el esperado. Caso contrario en las fases maduras (Operación) la experiencia del

personal hace que se desarrolle un ejercicio nutrido cumpliendo así con los objetivos trazados.

2.1.7 Áreas de Aplicación. El FMECA en sus inicios fue utilizado por las fuerzas militares, la aeronáutica y la NASA. Después de su estandarización se puede aplicar para sistemas, subsistemas, equipos y componente que conceptualmente cada uno de estos pueda realizar una función. Su aplicación se puede ser extensiva a equipos náuticos, facilidades de producción, refinación, petroquímica, industria automotriz, y todos aquellos procesos que estén vinculados a una cadena productiva automatizada.

2.2 INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO

La evolución de mantenimiento y la manera de subsistir en un mercado donde las empresas buscan asegurar y mejorar su competitividad por medio de diferenciadores, que tengan un valor agregado contundente que garanticen la confiabilidad de los activos de manera eficiente, con altos índices de productividad para lograr la satisfacción del cliente y usuarios satisfechos, riesgos reducidos al mínimo y optimización de los procesos para lograr las metas establecidas de las organizaciones.

El cambio de la economía, la evolución tecnológica, la presión de reducir y eliminar el desperdicio del los recurso, instalaciones con mayor complejidad, el impacto de las paradas no planeadas y los DAÑOS CATASTROFICOS que han segado miles de vidas y perdidas económicas incalculables a generado la necesidad de desarrollar estándares que apalanquen la gestión de mantenimiento, con el objetivo reducir los efectos negativos en la imagen de las organizaciones.

Los turbocompresores como activos críticos de un proceso necesitan de técnicas de ingeniería de mantenimiento sean aplicadas para lograr confiabilidad, disponibilidad y seguridad en los procesos.

Todo este compendio de herramientas para mostrar que se es competitivo y exitoso es necesario utilizar indicadores que evalúen el desempeño esperado. Factores claves como son la calidad, la productividad, la rentabilidad, la imagen, la seguridad e integridad son el conjunto que expresa el desempeño.

Con este argumento creemos que realizar un FMECA para la instrumentación de los turbocompresores es de suma importancia para lograr obtener la confiabilidad y disponibilidad establecida.

2.2.1 Confiabilidad. La palabra Confiabilidad se usa ahora con mucha frecuencia y desafortunadamente, algunas veces se ha desconocido el contexto y

la real implicación. Existen diversas técnicas de mejoramiento de confiabilidad para los activos el cual se han venido desarrollándose con constante deseo de buscar el mejor desempeño.

El concepto más conocido para definir confiabilidad: Es la probabilidad de que un equipo o sistema opere sin falla por un determinado periodo de tiempo, bajo unas condiciones de operación establecida.

Este concepto es utilizado algunas veces de manera equivocada debido al uso que se le da a la expresión Falla. Para muchos, falla significa solo paradas y así construyen modelos para calcular la probabilidad sin tener en cuenta que también hay una falla *cuando se es ineficiente, inseguro, costoso, sobremantenibilidad, desperdicios*, producción con alto nivel de rechazos y con impacto en reputación. Para nuestra valoración de este concepto, nos regiremos al estándar Internacional SMRP (Society of Maintenance & Reliability Profesional) donde se define de la siguiente forma.

Confiabilidad (R) Definición: Este indicador muestra la relación porcentual entre el tiempo trabajado sin eventos de falla y el tiempo total disponible. Para la medición de confiabilidad se usaran los datos particulares de un sistema en particular.

En esta valoración se tendrán en cuenta todos los eventos No Planeados provenientes de la prestación del servicio de Mantenimiento que generen falla del equipo.

El objeto del indicador es identificar el porcentaje de tiempo en que los equipos y/o el sistema se encuentran operando sin fallas.

Formula:

$$\% R_{EQP} = \left(\frac{HCAL - HNP}{HCAL} \right) * 100$$

$$\% R_S = \left(\frac{HCAL * \# EQP - HNP}{HCAL * \# EQP} \right) * 100$$

Componentes:

R_{EQP}: Indicador de confiabilidad por equipo (%)

R_s: Indicador de confiabilidad por sistema (%)

HCAL: Periodo en que se calcula el indicador (horas)

#EQP: Número de equipos operando en el periodo en que se calcula el indicador

HNP: Horas de parada generadas por eventos de mantenimiento no planeados (horas)

2.2.2 Disponibilidad. Bajo el estándar de la SMRP. Este indicador nos muestra la relación porcentual entre el tiempo trabajado sin eventos de falla, sin eventos de mantenimientos y el tiempo total disponible. Para la medición de confiabilidad se usaran los datos particulares de los sistemas.

En este indicador se tendrán en cuenta todos los eventos Planeados y No Planeados provenientes de la prestación del servicio de Mantenimiento que generen parada ya sea por mantenimiento preventivo, correctivo o falla del equipo.

Formula:

$$\% A_{EQP} = \left[\frac{HCAL - (HNP + HP)}{HCAL} \right] * 100 \quad 1)$$

$$\% A_s = \left[\frac{(HCAL * \#EQP) - (HNP + HP)}{HCAL * \#EQP} \right] * 100 \quad 2)$$

Componentes:

A_{EQP}: Indicador de disponibilidad por equipo (%)

A_s: Indicador de disponibilidad por sistema (%)

HCAL: Periodo en que se calcula el indicador (horas)

#EQP: Número de equipos operando en el periodo en que se calcula el indicador

HNP: Horas de parada generadas por eventos de mantenimiento no planeados – fallas (horas)

HP: Horas de parada generadas por eventos de mantenimiento planeados (horas)

En esta grafica se muestra una grafica de la disponibilidad de los turbocompresores para un semestre.

Tabla 1. Disponibilidad Turbocompresores de un semestre

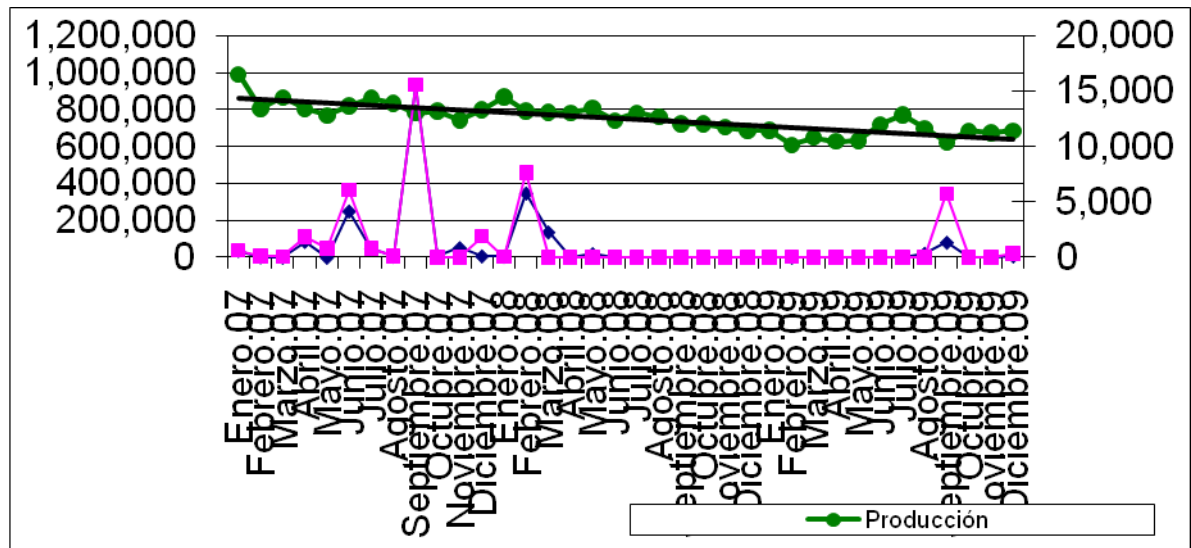
CUP TURBINAS	DISPONIBILIDAD	
	TARGET SUP	REAL
JUL	99.9%	100.0%
AUG	99.9%	100.0%
SEP	99.9%	100.0%
OCT	94.5%	94.7%
NOV	99.3%	99.3%
DEC	98.0%	97.9%
TOTAL	98.6%	98.6%

Tabla 2. Control de Disponibilidad real periodo de dos años y medio

CONTROL DE DISPONIBILIDAD PERIODO DOS AÑOS Y MEDIO							
	RIM bls	RIM %	Disp. Real	No Planeado bls	No Planeado %	Disp. Real	Producción
Enero.07	619	0.062%	0.300%	619	0.062%	0.300%	990599
Febrero.07	46	0.006%	0.356%	94	0.012%	0.350%	806966
Marzo.07	0	0.000%	0.362%	49	0.006%	0.356%	866402
Abril.07	1436	0.179%	0.183%	1847	0.230%	0.132%	802817
Mayo.07	0	0.000%	0.362%	800	0.104%	0.258%	768861
Junio.07	4164	0.507%	-0.145%	6053	0.737%	-0.375%	820997
Julio.07	782	0.091%	0.271%	782	0.091%	0.271%	860887
Agosto.07	100	0.012%	0.350%	100	0.012%	0.350%	834461
Septiembre.07	15556	1.993%	-1.631%	15566	1.995%	-1.633%	780358
Octubre.07	150	0.019%	0.343%	0	0.000%	0.362%	792065
Noviembre.07	862	0.116%	0.246%	0	0.000%	0.362%	743147
Diciembre.07	120	0.015%	0.347%	1883	0.236%	0.126%	799373
Enero.08	91	0.010%	0.352%	45	0.005%	0.357%	867906
Febrero.08	5784	0.730%	-0.368%	7645	0.964%	-0.602%	792683
Marzo.08	2276	0.290%	0.072%	0	0.000%	0.362%	785944
Abril.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	781528
Mayo.08	323	0.040%	0.322%	0	0.000%	0.362%	808039
Junio.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	739707
Julio.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	782923
Agosto.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	760112
Septiembre.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	723442
Octubre.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	723024
Noviembre.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	704135

Diciembre.08	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	684635
Enero.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	686052
Febrero.09	0	0.000%	0.362%	23	0.004%	0.358%	609243
Marzo.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	649108
Abril.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	627027
Mayo.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	632397
Junio.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	720321
Julio.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	772295
Agosto.09	358	0.051%	0.311%	0	0.000%	0.362%	698348
Septiembre.09	1349	0.217%	0.145%	5728	0.920%	-0.558%	622503
Octubre.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	685304
Noviembre.09	0	0.000%	0.362%	0	0.000%	0.362%	674871
Diciembre.09	116	0.017%	0.345%	360	0.053%	0.309%	685068
TOTAL	34,132	0.256%		41,594	0.362%		27,083,548

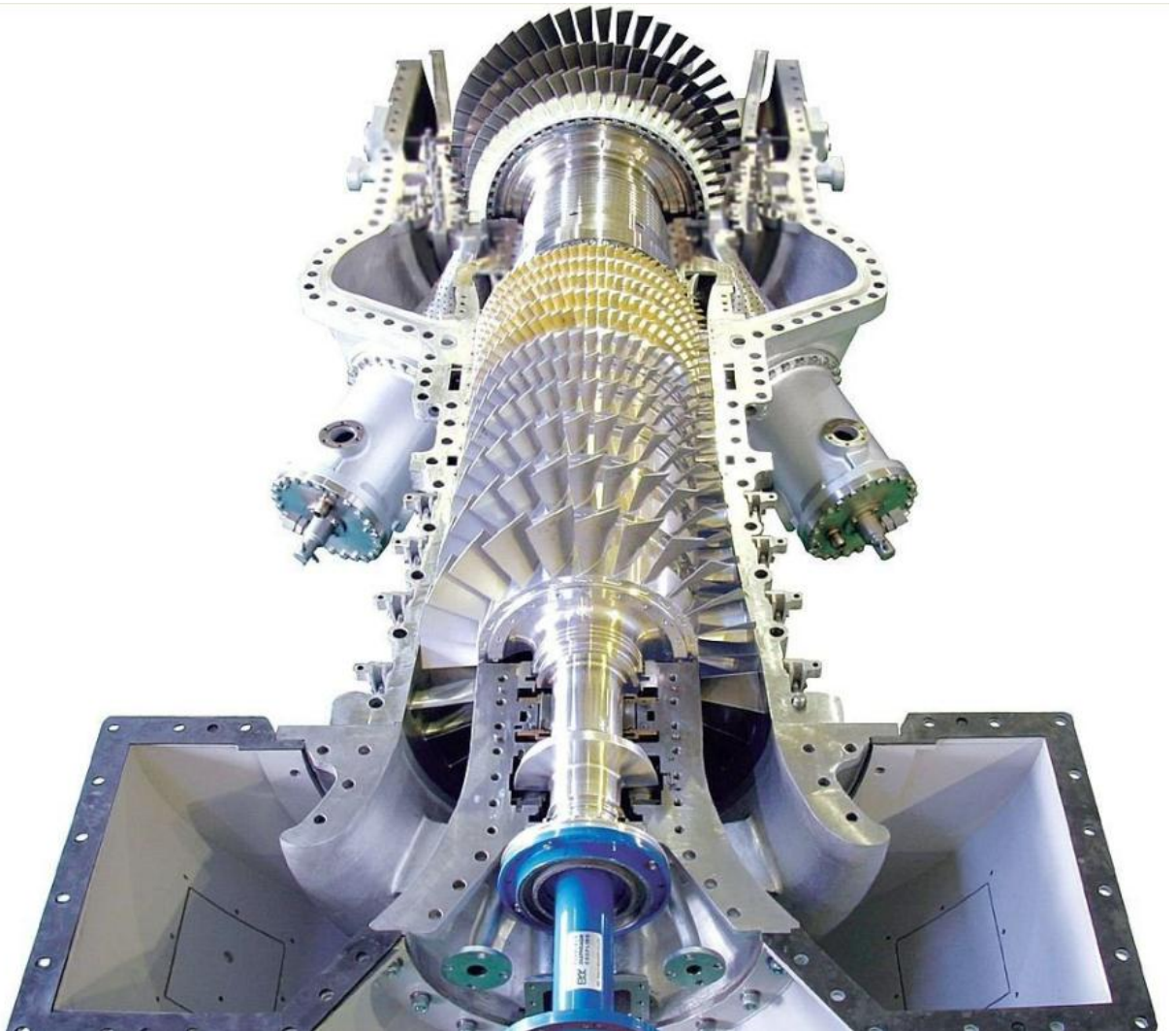
Figura 1. Proyección de curva de disponibilidad en el tiempo



3. TURBOCOMPRESORES

3.1 GENERALIDADES

Figura 2. Corte transversal de una turbina



Las turbinas a gas, son máquinas de manejo de calor, por excelencia para convertir energía Química de algún combustible, en potencia mecánica. Estas son máquinas similares de muchas formas a las de combustión interna de 4 tiempos, salvo que las turbinas son máquinas de trabajo continuo.

En la parte delantera de la turbina se encuentra el compartimiento de entrada de aire que contiene un silenciador para atenuar el ruido de alta frecuencia y un sistema de filtros que remueve las partículas extrañas antes que el aire entre en la turbina.

Las turbinas a gas poseen un compresor de aire, el cual toma el aire de la atmósfera, previamente es pasado a través de un filtro, para remover los sólidos. El aire es comprimido por secciones de alabes fijos y alabes rotativos de varias etapas, la relación de presión varía entre 7:1 y 13.5:1 dependiendo del tamaño y modelo de la máquina.

El aire de alta presión es pasado a las cámaras de combustión donde se mezcla con el combustible inyectado. La combustión de esta mezcla de aire / combustible incrementa su temperatura en la zona de la llama entre 2500°F y 4000°F. Esta temperatura es inmediatamente reducida, gracias al aire de exceso que se presenta en las cámaras de combustión.

La temperatura a la entrada de la sección de turbina es del orden de 1650°F y 2300°F. La alta temperatura sumada a la alta presión de la mezcla es dirigida al sección de la turbina, donde se expande a través de las etapas de la turbina hasta llegar a presión muy cerca a la atmosférica. En el proceso de expansión, parte de la energía removida del gas, impulsa el compresor de la turbina, los auxiliares tales como las bombas de lubricación y aceite hidráulico montado en el Gear Box de accesorios, además de la carga suficiente para manejar un generador o un compresor de gas.

Los gases de exhosto son enviados a la atmósfera a través de túneles dispuestos para reducir la contaminación sonora. En varias plantas se dispone de este calor para aumentar la eficiencia en plantas de generación de ciclo combinado.

3.2 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

La turbina con una serie de mecanismos de control y protección, utiliza combustible y aire para producir la potencia de los ejes. El rotor del compresor axial del aire de combustión dispone de 16 etapas.

La turbina tiene dos rotores independientes: Uno de primera etapa o de alta presión que mueva el rotor del compresor axial y los accesorios dependientes del

eje. En la segunda etapa o de baja presión, el rotor mueve el eje del compresor centrífugo de inyección de gas, El propósito de que los dos rotores de la turbina no estén acoplados mecánicamente es permitir que los dos ejes operen a diferentes velocidades para satisfacer los requerimientos de variación de carga del compresor centrífugo de Gas.

La turbina de gas tiene cuatro cojinetes lubricados de tipo elíptico de zapatas. Los cojinetes # 1 y 2 soportan el rotor del compresor axial y la primera rueda. Los cojinetes # 3 y 4 soportan el eje de carga y la rueda de segunda etapa. El diseño de cuatro cojinetes asegura que las velocidades críticas de las partes rotantes sean más altas que las velocidades del rango de operación. Esto también permite arranques, cargas y paradas rápidas. Adicionalmente, esto permite que los alabes del compresor axial mantengan las tolerancias para obtener la eficiencia de los componentes y una alta potencia disponible.

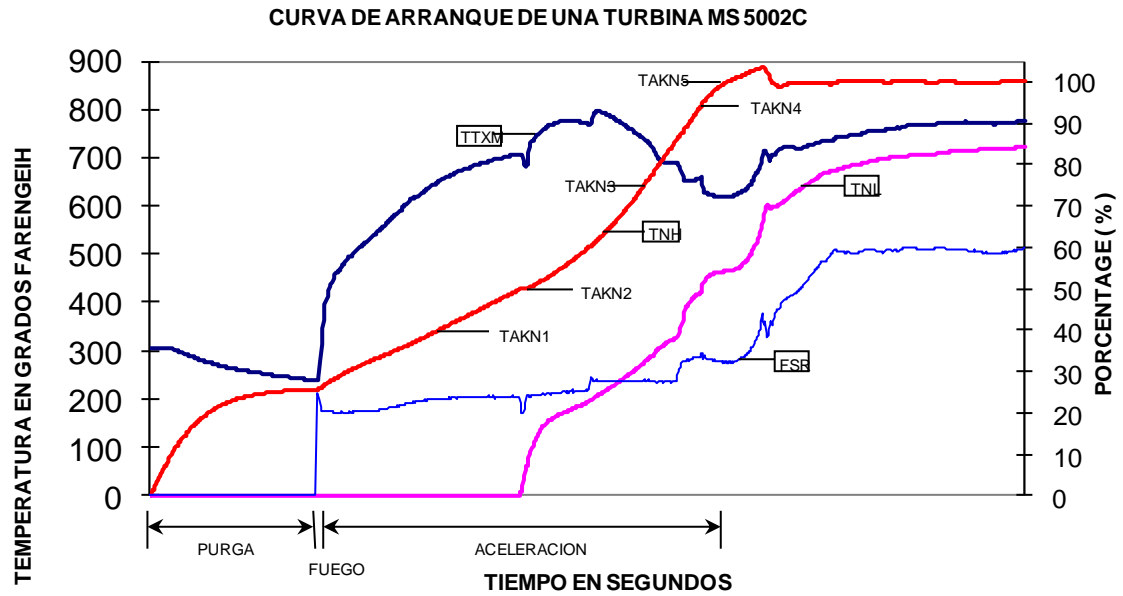
La velocidad crítica es el punto en que el cual la frecuencia del eje alcanza la frecuencia natural de giro del eje produciendo resonancia y por lo tanto altas vibraciones. En los cambios de carga, se puede presentar vibración o muy alta vibración en el conjunto de la caja de multiplicación - compresor centrífugo. Algunas, presentan este evento entre 89 y 91 % de la velocidad nominal (Eje de alta 5100 RPM y compresor centrífugo 8900 RPM) del eje del compresor centrífugo. Para prevenir esta situación se debe pasar este estado lo más rápido posible.

Ambas ruedas o turbinas tienen alabes largos y de aleación especial, montados en guías ranuradas. Durante mantenimientos totales de la turbina al desmontar los alabes, estos deben numerarse en el orden de posición, lo mismo que el sitio del rotor donde va montado. Esto con el fin de evitar errores en el montaje lo cual ocasionaría graves vibraciones en el eje.

Las ruedas de la turbina son refrigeradas con aire que se extrae de la décima etapa del compresor axial y del sello de aire de alta presión del compresor axial. La temperatura entre ruedas es monitoreada por termocuplas. Las carcasas de la turbina son divididas para conveniencia del desmontaje. La descarga del compresor axial está contenida en una carcasa fabricada y separada de la carcasa del compresor axial, que se puede desarmar en sección radial.

La turbina de dos ejes está diseñada para operar solo con gas combustible. Existen turbinas con sistemas de combustibles duales (diesel y gas), y en algunos casos se puede presentar problemas en las boquillas inyectoras con diesel el cual puede producir taponamiento por coquización presentando problemas al pasar nuevamente a gas combustible.

Figura 3. Curva de arranque típico de una Turbina 5002C



3.3 CICLO BRAYTON

El ciclo de termodinámica que describe la operación de todas las turbinas de gas es el ciclo Brayton.

Figura 4. Vista lateral de una turbina modelo 5002C.

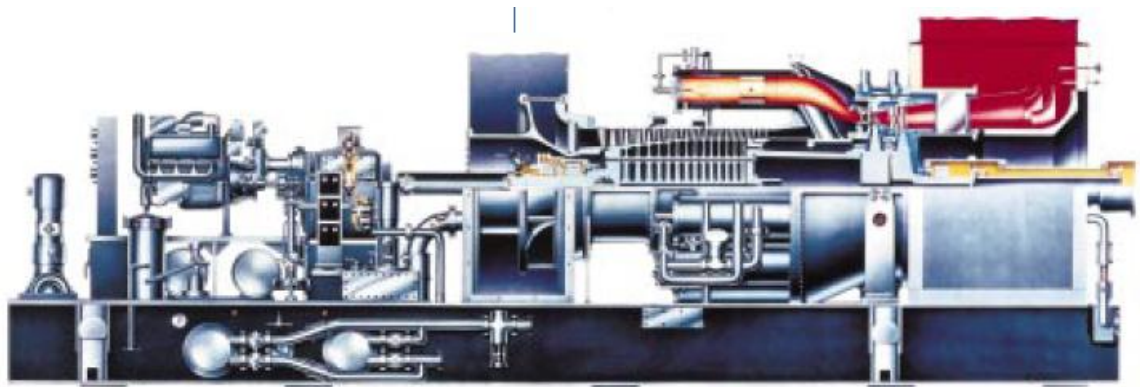
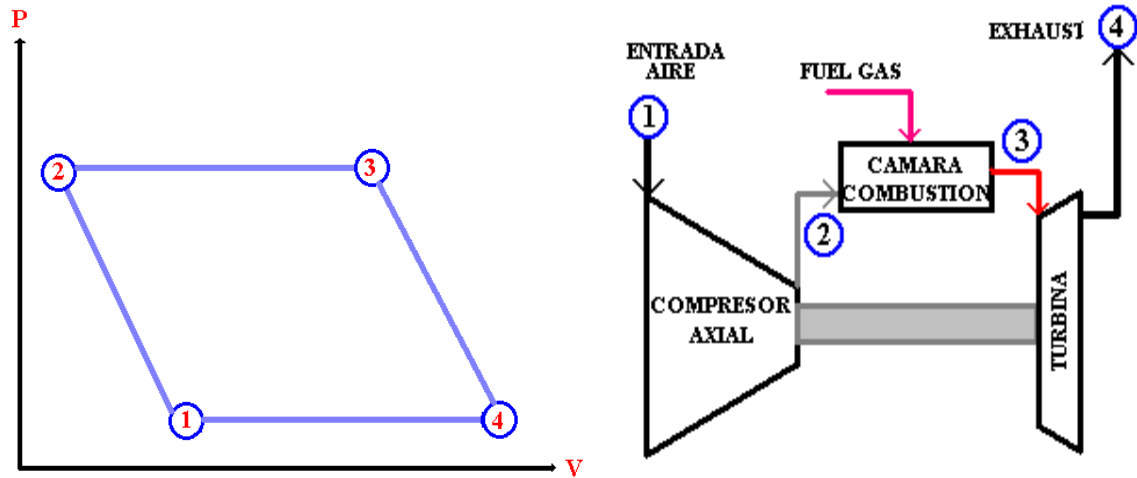


Figura 5. Ciclo de Bryton (Encendido de una turbina)



Las distintas etapas que se presentan en el ciclo son:

Compresión. 1 al 2, El aire tomado de la atmósfera es comprimido a través de las diferentes etapas del compresor axial.

Calentamiento. 2 al 3, El aire comprimido es mezclado con gas para ser calentado y los gases calientes forman la energía térmica, disponible.

Expansión. 3 a 4, los gases son liberados y son llevados a las ruedas de turbina, para desarrollar la fuerza mecánica.

Enfriamiento. Los gases luego de pasar por las ruedas, pierden temperatura y presión. Estos son enviados a la atmósfera a través del exhosto, terminando así el ciclo. Existen otros tipos de ciclo llamados combinados, donde se aprovecha el calor de los gases del exhosto para incrementar la temperatura del aire antes de entrar a las cámaras de combustión.

3.4 COMPRESORES CENTRIFUGOS

El compresor centrífugo es una máquina que consiste en un rotor que gira dentro de una carcasa, provista de aperturas. La entrada (boquilla de succión) y salida (boquilla de descarga) de fluidos. El rotor es un componente que convierte la energía mecánica del eje en movimiento y por lo tanto en energía cinética del fluido que pasa a través de él. En la carcasa se encuentra un componente llamado difusor, que convierte la energía cinética en energía potencial el cual hace que la velocidad del fluido disminuya y la presión del fluido aumente. Así

pasando por las diferentes etapas se completa el ciclo haciendo que el fluido gane energía aumentando su presión en la boquilla de descarga.

Límites de un compresor. Las máquinas están construidas para soportar esfuerzos mecánicos hasta ciertos límites, dentro de los parámetros de diseño. La máxima presión, el máximo flujo y la máxima potencia mecánica, delimitan el trabajo del compresor.

El fenómeno de surgencia en un compresor es un estado de riesgo para cualquier tipo de compresor. Surge es la auto oscilación de la presión y flujo, que incluye una reversión de flujo. La reversión de flujo en surge es el único punto de la curva en que la presión y flujo caen simultáneamente

Figura 6. Corte Transversal compresor centrifugo

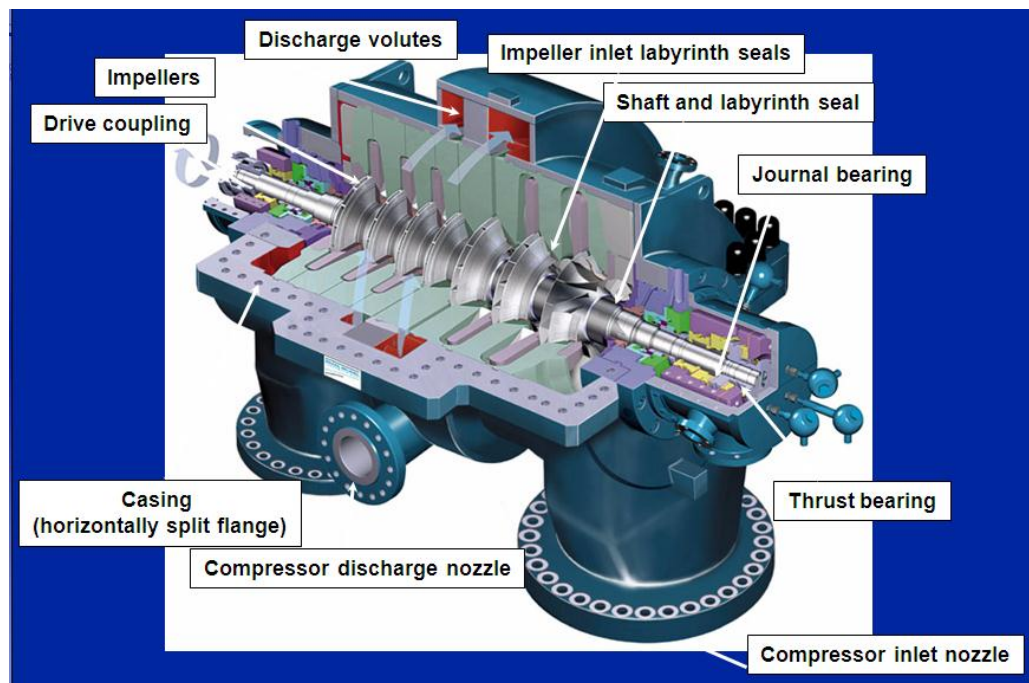
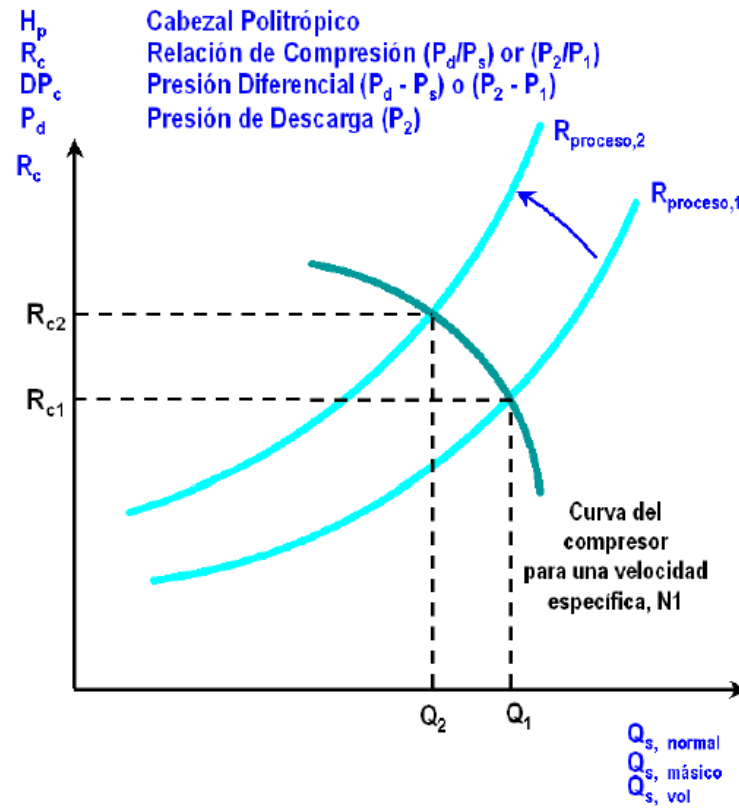


Figura 7. Mapa de caracterización de un compresor centrífugo

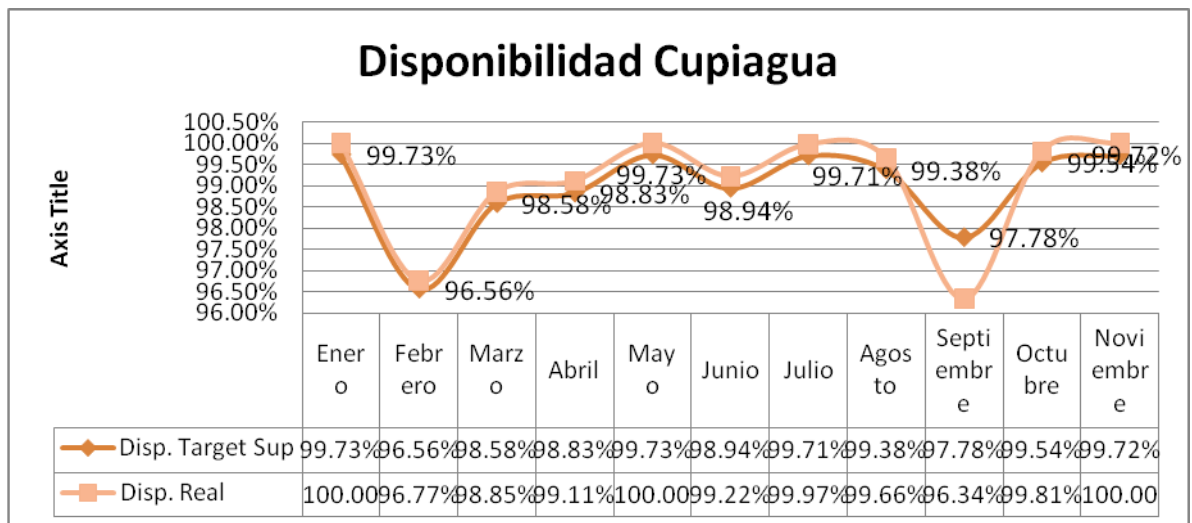
Desarrollo de la curva del compresor



4. ESTRUCTURA Y ANALISIS DE LA INFORMACION

En la gráfica anexa se muestra el comportamiento de la disponibilidad de los turbocompresores de reinyección en el 2010. Es de resaltar que la rata de fallas en instrumentación es baja, pero como se mencionó anteriormente, el ciclo de vida útil conceptualmente se encuentra en la curva P-f por lo tanto la predicción de tener una falla se hace mayor.

Figura 8. Análisis de la disponibilidad de los turbocompresores en instrumentación



Como la rata de falla de los equipos de instrumentación es baja. El análisis de FMECA se basará en el método cualitativo. El Juicio de Expertos cobra un papel importante para la clasificación de la probabilidad, severidad para hallar el resultado de la criticidad.

4.1 REQUERIMIENTOS

Para lograr los resultados esperados del FMECA se consideraron las siguientes premisas o bases para el desarrollo del ejercicio.

- ❖ Esquemáticos o P&IDs del Sistema
- ❖ Identificación de cada instrumento con las especificaciones técnicas

- ❖ Diagramas de Lazo de los instrumentos que actúan como sensores y van a un Logic Solver para tomar una acción sobre un elemento final de control.
- ❖ Principio de Operación de la Turbina y el Compresor
- ❖ Principio de Operación de cada instrumento con un nivel de profundidad intermedio.
- ❖ Este ejercicio demanda un aporte de juicio de Expertos, por lo tanto se contara con el soporte de especialistas en el área eléctrica, mecánica e instrumentación.
- ❖ Se han definido una metodología para lograr el éxito de ejercicio. Esto da la oportunidad de tomar las acciones correctivas necesarias durante el desarrollo del ejercicio.

4.2 TAXONOMIA DE LA INSTRUMENTACION DEL TURBOCOMPRESOR

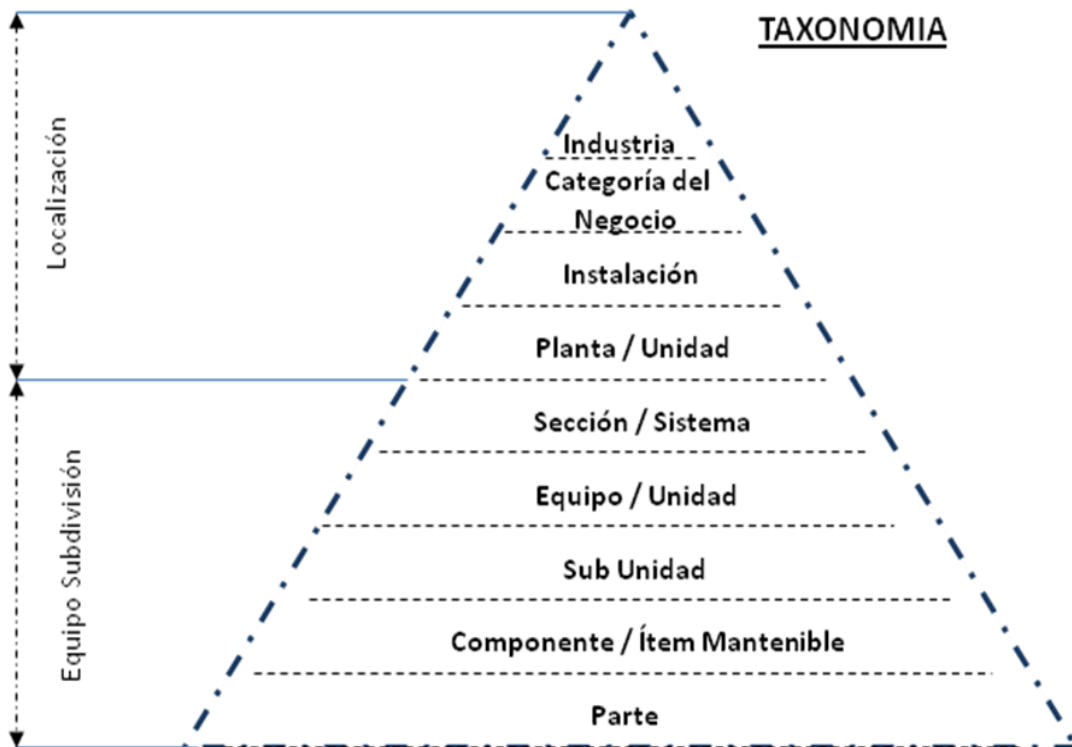
Para la industria del petróleo y petroquímica en los últimos años se ha creado la necesidad de garantizar la seguridad de los procesos, la confiabilidad y la mantenibilidad de los equipos. Igualmente en la industria se ha hecho un énfasis fuerte en el costo – efectividad tanto para el diseño y mantenimiento en las nuevas plantas.

Con respecto a los datos de las fallas, los mecanismos de falla y la mantenibilidad debe contar con una estructura que facilite dicha clasificación. Esta clasificación requiere de un claro entendimiento de las características técnicas de los equipos, su operación, el impacto en el proceso y sus posibles fallas potenciales. Por lo tanto se hace necesario definir la Taxonomía del turbocompresor teniendo en cuenta que se debe definir los límites del equipo o sistema.

La Taxonomía es una clasificación sistemática de los ítems mantenibles dentro de un grupo basado en un posible factor común de los diferentes equipos. (Equipo, Sistema, Subsistema, Componente). La recolección y clasificación puede ser definida bajo el estándar ISO-14224 como se muestra en la figura 4. Los niveles del 1 al 4 representa la categorización para la industria y planta el cual puede ser utilizado para diferentes industrias y configuración para el análisis de la confiabilidad de equipos similares y poderse comparar con otras unidades de negocio que tienen el mismo contexto operativo. Los niveles del 5 al 9 representan los niveles más bajos de cada equipo que define la relación Padre-Hijo o Subsistemas y sus componentes o ítems mantenibles.

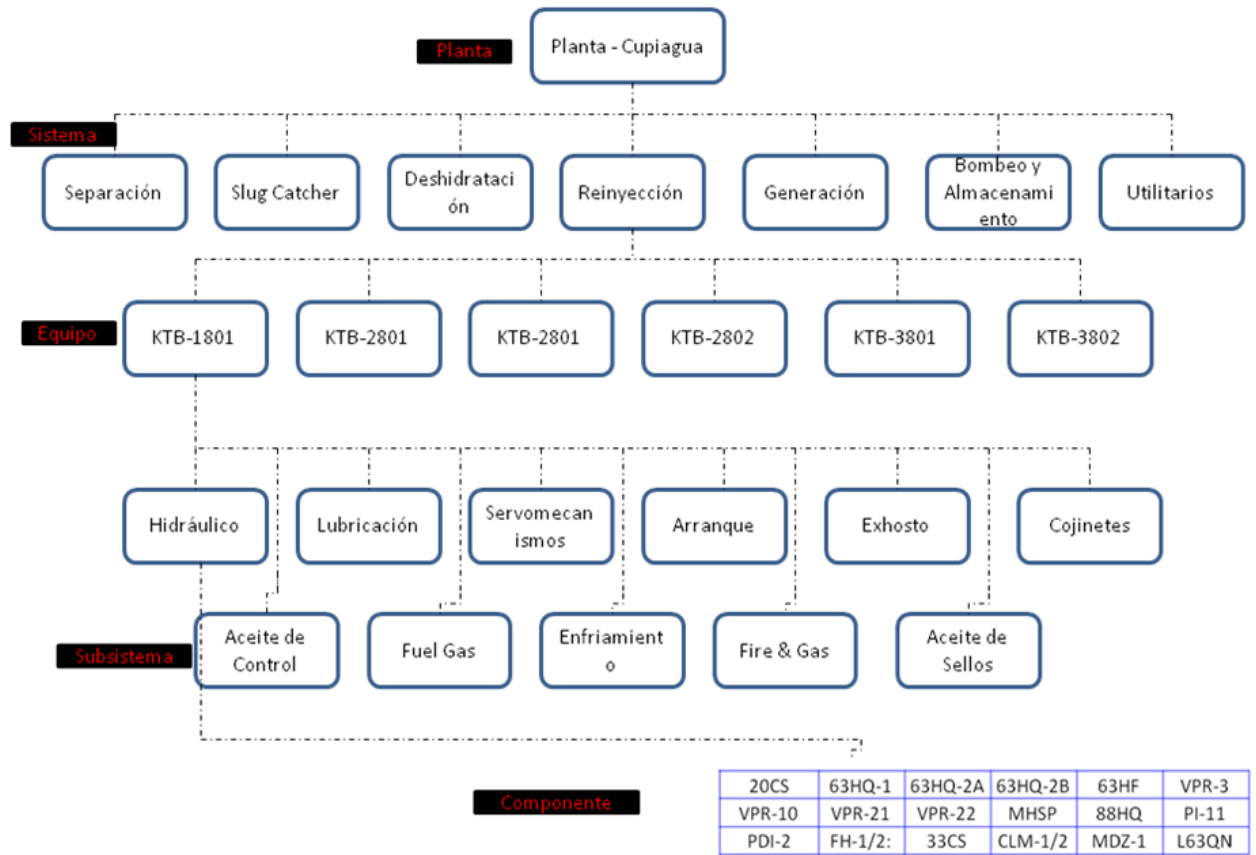
El nivel utilizado para la recolección y organización de la información depende de la complejidad de los equipos. Como referencia un instrumento se considera el nivel mas bajo para un turbocompresor de un buen nivel de complejidad. Los datos recolectados en el tiempo pueden ser utilizados para evaluar la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de dicho ítem mantenible.

Figura 9. Taxonomía según la ISO-14224



Con base a este estándar se definió la Taxonomía del Turbocompresor como se muestra en la Figura 5.

Figura 10: Taxonomía del Turbocompresor ubicado en la planta de Cupiagua.



4.2.1 Lógica Narrativa de los Subsistemas. Para lograr una excelente desarrollo del FMECA es de suma importancia conocer el principio básico de cada subsistema el cual se narra en síntesis para cada uno de ellos.

4.2.1.1 Subsistema de Aceite Hidráulico. La energía del fluido necesaria para operar los componentes del sistema de combustible de la turbina es producida por un sistema de bombas hidráulicas. El fluido alimenta los sistemas que abren o cierran las válvulas de gas combustible, además los alabes guía de entrada variable (IGV), las boquillas de segunda etapa (Nozzles) y los dispositivos de disparo hidráulica del sistema de protección. Los componentes principales incluyen la bomba de abastecimiento principal, una bomba auxiliar, los filtros del sistema, un acumulador y un manifold.

El Aceite regulado y filtrado del cabezal de cojinetes se utiliza como fluido para la succión de las bombas del sistema hidráulico. Una bomba de pistones accionada por un eje del engranaje de accesorios es la bomba principal del sistema y una bomba auxiliar de tipo centrífugo accionada por un motor eléctrico.

El aceite hidráulico presurizado por la bomba hidráulica principal se controla por el compensador de presión VPR-3 (1243 ± 29 psig) montado en la misma bomba. La acción del compensador varía la carrera de la bomba para mantener una presión de ajuste en la descarga de la bomba.

Al arrancar la turbina mientras que la bomba no está operando a la velocidad específica, la bomba auxiliar arranca y continúa operando hasta que el sensor de velocidad 14HS indique que la mínima velocidad de gobernación se alcance.

La presión de aceite hidráulico de la bomba auxiliar se controla por el compensador de presión VPR-10 (1171 ± 29).

Cuando la bomba principal opera, pero falla para mantener la presión adecuada, la condición será sensada por el switch de presión 63 HQ-1 (1000 psig bajando) y la bomba auxiliar arrancará por acción de este switch. Si hay una caída de presión por debajo de un valor predeterminado el switch 63HQ-2A (870 psig bajando) inicia el disparo de la turbina. Un segundo switch de presión 63HQ-2B (870 psig bajando) sirve de respaldo si el switch 63 HQ-2A falla.

El fluido hidráulico se bombea al manifold, las dos válvulas de alivio, dos de válvulas de purga y dos válvulas cheques complementan el sistema. Una válvula reguladora de presión VR-22 (1313 ± 29 psig) controla la presión de descarga de la bomba auxiliar mientras que otra válvula reguladora de presión VR-21 protege el circuito bomba principal de daños en el evento de la falla del compensador de la bomba principal. El aceite del manifold pasa por los filtros y queda listo para alimentar el sistema.

Una acción de protección primaria entre el sistema de control de la turbina y el sistema de presión se une a los componentes de la turbina que abren o cierran las válvulas de gas combustible.

Un sistema de tres acumuladores sirve para amortiguar choques cuando arrancan las bombas de suministro.

Un switch de presión diferencial 63HF-1 (72.5 psig subiendo) activa la alarma cuando la caída de presión de los filtros es de tal magnitud que requiere reemplazo de los elementos filtrantes. Aunque los filtros soportan una caída de presión de 72 psig, el ajuste de la presión diferencial de switch debe estar

significativamente por debajo de esta valor para asegurar que no sufran daño los elementos.

4.2.1.2 Subsistema de Aceite de Lubricación. La turbina se lubrica por un lazo cerrado sistema de alimentación de aceite forzada que incluye bombas, intercambiadores de calor, filtros, válvulas y otros dispositivos que controlan y protegen el sistema. El aceite lubricante circula a los cojinetes, accesorios y equipos de carga. Además se suministra aceite para el sistema hidráulico, el sistema de control y el sistema de arranque. El tipo de lubricante empleado para suministrar presión de lubricación, Hidráulica, control y racheo es de base de Petróleo Teresso 32. Todo el aceite reside en un tanque con una capacidad de 22000 Litros, donde es acondicionado a temperatura de trabajo 138°F.

El sistema de lubricación posee bombas y control de presión para suministrar aceite al cabezal de lubricación a una Presión de 25 - 30 PSI. Esta presión es la base para los sistemas de aceite hidráulico y de racheo (1.200 PSI)

El sistema es de lazo cerrado y de alimentación forzada, el aceite succionado de los tanques por las bombas es forzado por la presión a través de los intercambiadores de calor, filtros de aceite y el manifold de aceite a los cojinetes. La presión regulada a 25 PSIG en el cabezal de presión para cojinetes es descargado por las bombas. El sistema de protección está incorporado con el fin de proteger el suministro de lubricación en caso de baja presión, bajo flujo y bajas temperaturas.

El tanque de lubricante es parte de la base de la turbina, en la sección de accesorios las bombas de lubricantes, intercambiadores de calor (enfriadores) y los varios dispositivos de protección de presión se encuentran debidamente instalados. Tres bombas de aceite lubricante se utilizan en el sistema, la bomba principal, la bomba auxiliar manejada por corriente alterna y la bomba de emergencia accionada por motor de corriente directa.

La bomba principal de aceite es de desplazamiento positivo, localizada en la base del engranaje de accesorios y accionada desde el eje del compresor. La salida de esta bomba esta limitada por una válvula de contra presión VPR1 (145 ± 7.25 psig). La bomba auxiliar de lubricación proporciona la presión durante el arranque y parada de la turbina; cuando la bomba principal no pueda abastecer la presión necesaria de operación la bomba auxiliar arrancará por el switch de baja presión 63QA-1 (120 psig bajando). Durante la secuencia de arranque, la bomba arranca cuando recibe la señal el circuito de control a través de contacto normalmente cerrado del switch 63QA-1. La bomba de emergencia es de tipo centrifuga, abastece el suministro de aceite al cabezal de los cojinetes principales. En caso de que la bomba auxiliar se hubiera sacado de servicio o que sea incapaz de mantener la presión adecuada del aceite.

Varios tipos de válvulas se utilizan en este sistema para controlar la presión y regular el flujo. Las válvulas chequeas están colocadas en la tubería de descarga de cada bomba para prevenir el envío del aceite al tanque de almacenamiento. Es una válvula montada en la consola de manómetros, la cual proporciona los medios para chequear el arranque automático de la bomba auxiliar de aceite con señales que se generan por alarma de baja presión de aceite debido al switch de arranque 63QA-1 (120 psig bajando), durante operación normal de la turbina. Cuando la válvula es abierta, la presión de aceite lubricante en el switch cae hasta su setting de presión, la bomba auxiliar arrancará.

La condición de “Arranque de la bomba auxiliar de lubricación” será mostrada en la pantalla del Mark V. Cuando la válvula de prueba está cerrada, la bomba continuará en línea hasta que sea apagada manualmente por el operador desde el sistema de control Mark V.

Es una válvula montada en la consola de manómetros, la cual proporciona los medios para chequear el arranque automático de la bomba de emergencia de aceite con señales que se generan por alarma de baja presión de aceite debido al switch de arranque 63QL (10.15 psig bajando) y parada automática de la bomba de emergencia de aceite con señales que se generan por el switch de parada 63QN (20.3 psig subiendo). Esto puede ser realizado mientras que la turbina está operando normalmente o cuando la turbina está parada y el sistema de lubricación este siendo abastecido por la bomba auxiliar de corriente alterna.

La presión en el cabezal principal de lubricación se mantiene en 25 psig por medio de la válvula reguladora de presión VPR2. Esta válvula está instalada en la línea de descarga de los filtros aguas abajo del orificio de prueba. Un orificio de bypass es también instalado en la válvula VPR2 para permitir recorridos limitados y regulación de fluctuaciones. Además este asegura flujo al cabezal de lubricación de cojinetes en el evento de un mal funcionamiento o cierre de la VPR2.

El subsistema de lubricación posee un circuito que durante los periodos de parada el lubricante se mantiene en la viscosidad apropiada para el arranque de la turbina por los calentadores QT1 y QT2, instalados en el tanque principal. El switch de temperatura 26QL (77 F) enciende los calentadores y el 26QM (90.5 F) los saca de servicio.

Caso contrario para las altas temperaturas la unidad de enfriamiento de aceite lubricante es un conjunto fuera de la base que contiene un intercambiador de calor con tubos aleteados para enfriar el aceite con aire forzado por ventiladores. El aceite debe ser enviado al manifold de la turbina a una temperatura que garantice la adecuada viscosidad este mismo.

La válvula reguladora de temperatura VTR1 controla el flujo de aceite a través de la unidad de enfriamiento, está se encuentra instalada en la línea de alimentación al filtro, aguas abajo de la unidad de enfriamiento. La acción de la válvula es controlada por un indicador controlador de temperatura TIC-01, el cual mantiene la temperatura del aceite en un valor predeterminado. La válvula abre para permitir mayor paso de aceite al aerofriador y cierra cuando la temperatura del aceite es baja, restringiendo el paso al aerofriador.

La filtración de todo el aceite se efectúa por un filtro de 25 micrones de fibra inorgánica, ubicado justamente después del aerofriador. Se utilizan dos filtros con válvulas de transferencia entre ellos dirigen el flujo a través de los filtros y al cabezal. Los filtros deben cambiarse cuando la presión diferencial indique 24 psig, o cuando el switch de presión 63QQ (24.65 psig subiendo) de alarma en el Mark V.

4.2.1.3 Subsistema de Aceite de Control. El sistema de protección de la turbina consiste de un número de sistemas primarios y secundarios, muchos de los cuales operan en cada parada y arranque normal. Los otros sistemas y componentes son estrictamente para condiciones de operación anormal y de emergencia que requieren parada de la turbina.

Algunos de estos sistemas de protección y sus componentes operan a través del sistema de control SPEEDTRONIC Mark V mientras que los otros sistemas operan directamente sobre los componentes de la turbina de forma totalmente independiente del panel de control SPEEDTRONIC Mark V. El sistema hidráulico de parada es la interface primaria de protección entre el panel de control y los componentes de la turbina que permiten o cierran el combustible a la turbina.

El sistema de aceite de disparo, toma aceite del sistema de aceite lubricante de la turbina. El fluido pasa a través de una platina de orificio para ser regulado. Este orificio esta diseñado para limitar el flujo del fluido lubricante y asegurar una capacidad adecuada para los dispositivos de parada sin causar alteraciones del sistema de lubricación cuando el sistema de aceite de disparo se active.

El sistema de aceite de disparo también provee una conexión directa a los dispositivos mecánicos de parada por sobre velocidad del eje de alta y baja presión. Los switches 12HA y 12LA proveen la señal de alarma al sistema de control Mark V.

Switches redundantes de presión 63HG-1 (60 psig bajando), 63HG-2 y 3 (25 psig bajando), instalados en el sistema de aceite de disparo, proveen retro alimentación al sistema de control de la turbina y al circuito de permisivos, asegurando el nivel de presión requerido en el sistema de aceite de disparo para la operación de la turbina.

Una válvula solenoide 20HD y una válvula manual VM3 para parada de emergencia también se encuentran instaladas en el sistema de aceite de disparo. Una señal de trip recibida por el sistema de protección primario energizará la válvula solenoide 20HD, descargando el aceite del sistema de disparo al drenaje. Esta acción abrirá los nozzles de la segunda etapa, se cerrará la válvula de parada de gas combustible, parando la turbina. La válvula manual de parada de emergencia también descargara el aceite del sistema de disparo al drenaje con resultados similares.

La boquilla de la segunda etapa divide la energía disponible entre las turbinas de alta y baja presión, abriendo esta boquilla de segunda etapa de ángulo variable decrece la contra presión en la turbina de alta, resultando una caída de presión más alta y por lo tanto se genera más torque en la turbina de alta presión por lo tanto la velocidad de la turbina de alta presión y el compresor axial se incrementará.

El posicionamiento de las particiones de la boquilla se efectúa moviendo el anillo de control en respuesta a la actuación de un cilindro hidráulico.

El diseño de la turbina de dos ejes proporciona requerimientos de torque de arranque más bajos, niveles de operación ambiente más altos, operación sin carga dentro de los límites de velocidad y temperatura, también una menor tasa de calor con alta carga. La porción hidráulica del control de los nozzles consiste de un cilindro hidráulico, una servo válvula, una válvula de descarga, tres acumuladores y dos transductores lineales de desplazamiento.

El aceite hidráulico entra al manifold, pasa a través de válvulas cheques y orificios diseñados para permitir una entrada de aceite sin restricciones, pero limitando la rata de caída de presión siempre y cuando la presión de suministro falle. Los acumuladores de tipo pistón esta diseñados para asegurar que halla suficiente aceite hidráulico para abrir los nozzles cuando haya una pérdida de presión de suministro de aceite de control y para suplir los picos de demanda de aceite durante los movimientos del cilindro hidráulico. El arreglo de los cilindros permite que cualquiera de ellos se saque de línea durante la operación normal de la turbina y sea drenado para chequear la carga de gas y recargarlo de ser necesario.

La válvula de descarga de los nozzles está diseñada para monitorear la presión del aceite del sistema de trip, y permitir el control del cilindro hidráulico por la servo válvula cuando la presión del aceite del sistema de trip sea alta, o para pasear la servo válvula y causar que el cilindro hidráulico abra completamente los nozzles siempre que se de una perdida de aceite del sistema de trip. La despresurización de la válvula de descarga re direcciona el aceite hidráulico para hacer que el actuado hidráulico abra completamente los nozzles.

El cilindro hidráulico es de doble acción, un extremo de la barra es conectado al anillo de los nozzles y el otro a los transductores lineales de posición. La salida de los transductores es usada por el sistema de control Mark V como parte del loop cerrado de control de posición.

4.2.1.4 Subsistema de Fuel Gas. Las válvulas de control de gas (STOP RATIO VALVE & GAS CONTROL VALVE): La cantidad de gas entregado a la combustión depende de la carga que maneje la turbina y para ello se regula el flujo de gas por medio de 2 válvulas de falla al cierre llamadas SRV (Stop Ratio Valve) y GCV (Gas Control Valve). Las válvulas mantienen una presión constante entre ellas y se ajustan para entregar más gas para mayor potencia.

La válvula de relación y parada (SRV), ejecuta 2 funciones que es mantener una presión constante aguas abajo y la otra es de brindar seguridad en el momento de parada, pues ésta habilitada directamente por la presión de aceite de control.

La válvula controladora de gas (GCV) abre para permitir mayor flujo de gas a las cámaras, ésta en caso de parada, cierra y realiza el doble bloqueo (SRV y GCV). Hay una tercera válvula que es solenoide llamada L20VG que permite despresurizar el tramo de unión de las válvulas GCV y SRV. Tanto la SRV como la GCV, son controladas por el sistema de control por servo válvulas con señal de retroalimentación de posición con LVDT.

El control de entrada de aire al compresor axial es regulado con los alabes variables INLET GUIDE VANE IGV el cual durante el arranque de la unidad se encuentran en cerrados a 42 grados. A medida que la unidad acelera el algoritmo de control la lleva hasta una apertura de 84 grados el cual se mantiene constante cuando la unidad se encuentra trabajando en régimen. Este mecanismo es movido por un cilindro hidráulico que es asistido por servo válvulas con señal de retroalimentación de posición con LVDT.

4.2.1.5 Subsistema de Arranque. Antes de que la turbina pueda llegar a la condición de fuego. Esta debe pasar por la condición de Crank, subsistema de arranque el cual acompañado de un motor de inducción eléctrica el cual transmite el movimiento mecánico al convertidor de torque para proveer el Crank de la máquina dando la velocidad al eje de alta para llevar este a la condición de fuego. El Crank también provee la baja rotación de la turbina para enfriamiento después de producirse una parada.

Durante la secuencia de arranque la turbina los cilindros hidráulicos son cargados con presión a 1250 psi produciendo movimiento para el cierre de las mordazas. El convertidor de torque es cargado con la presión de aceite hidráulico el cual comienza girar por el movimiento mecánico producido por el motor. La presión de aceite hidráulica es liberada en los cilindros, cuando el relé de velocidad cero es desactivado. El incremento de la velocidad por el convertidor de torque y a su

vez a al Gear box logra llevar la velocidad de la maquina hasta una velocidad del 25% para posteriormente entrar en la etapa de Fuego.

Cuando la unidad se produce un paro. El subsistema activa la secuencia del Racthe. La bomba del Racthe se energiza a la vez que la electroválvula L20CS la cual permite el paso de aceite a los cilindros hidráulicos para producir el cierre de las mordazas. Seguidamente se activa la electroválvula L20HR que permite el accionamiento del mecanismo que gira el eje un cuarto de vuelta. Terminado el recorrido se des energiza los dos solenoides L20CS y L20HR.

4.2.1.6 Subsistema de Exhosto. Los gases de combustión son descargados al Plenum de exhosto donde son propagados y liberados a través de una chimenea. Los gases de combustión es el producto del comportamiento de la temperatura en las cámaras de combustión. El sistema de control Mark V regula la temperatura de los gases calientes en varios escenarios.

- Cuando la unidad está en la curva de arranque, calentamiento, aceleración y estabilización.
- Cuando la unidad se encuentra trabajando a régimen y por exigencia de la carga, necesita acelerar el control que regula la temperatura, no exceda los límites exotérmicos de la máquina para evitar el deterioro de los componentes mecánicos.

La función primaria del control y monitor de combustión es evitar daños de algunos componentes de la turbina. Este algoritmo detecta una combustión anormal reflejada en las temperaturas de escape. Este algoritmo es habilitado cuando la señal lógica L4 y L14HS estén en estado lógico de 1.

Una combustión anormal puede ocasionar ruptura de las piezas de transición, perdida de fuel gas, llama en un combustor u otra mala función del combustor.

El monitoreo de la combustión depende totalmente de los valores medidos por las termocuplas del exosto, por lo tanto, es importante que cada una de las termocuplas se encuentre operando en optimas condiciones.

El spread permisible en el monitoreo de combustión: El algoritmo de control para el spread permitido (TTKSPV5), usa la temperatura de medida de descarga del compresor axial (CTD) y el valor promedio de temperatura de exhosto (TTXM), para calcular el SPREAD PERMISIBLE, TTXSPL.

El valor de CTD esta limitado por las constantes TTKSPL1 = 700 F max, y TTKSPL2 = 300 F min.

Con base en estos valores podemos determinar el spread promedio permisible así:

$$TTXSPL = TTKSPL4 * TTXM - TTKSPL3 * CTDA + TTKSPL5$$

Ejemplo:

$$TTXSPL = 0.12 * 941 - 0.08 * 558 + 47$$

Donde,

TTXSPL4 = Constante de ganancia del monitor de combustión.

TTXSPL3 = Constante de ganancia límite del monitor de combustión.

TTKSPL5 = Offset de temperatura externa limitada en CTD del monitor de combustión.

El spread permitido para la condición de velocidad constante está entre, 30 F y 120 F.

El modulo ITC(Constante de tiempo integral) incluido en el algoritmo de cálculo, permite incrementar el valor del spread en 150 F, para poder ajustar la velocidad de la turbina, en la condición de control por temperatura, permanece constante la velocidad y el valor de spread.

La señal lógica que permite este cambio es L83SMPB. Esta cambia a estado lógico (1) cuando hay un aumento o disminución de velocidad, cambio del valor de FSR y durante el arranque, habilitando rápidamente la posibilidad de acelerar la unidad con un spread aumentado en 150 F. En el momento que la señal L83SMPB, cambie a estado lógico CERO, el valor del spread comienza a disminuir en un 63% cada 100 segundos, hasta llegar a su valor normal de spread en 5t.

El valor obtenido del spread permisible es multiplicado por las constantes TTKSP1/2/3/4, valores que se suman al promedio de las temperaturas de exhosto (TTXM), para obtener las alarmas de alto (TTHA) y bajo (TTLA) spread, y los límites de alarma de alto (TTHT) y bajo (TTLT) spread.

$$TTHA(\text{high alarm}) = TTXM + TTKSP2 * TTXSPL$$

$$TTLA(\text{low alarm}) = TTXM - TTKSP4 * TTKSPL$$

$$TTHT(\text{high trip}) = TTXM + TTKSP1 * TTXSPL$$

$$TTLT(\text{low trip}) = TTXM - TTKSP3 * TTXSPL$$

Condiciones que producen una alarma:

➤ Si dos termocuplas de exhosto adyacentes caen por debajo de TTLA, esta condición podrá causar una alarma de combustión.

➤ Si una termocupla de exhosto sube por encima del valor de TTHA y otra termocupla de exhosto cae por debajo del valor de TTLA, podrá causar una alarma.

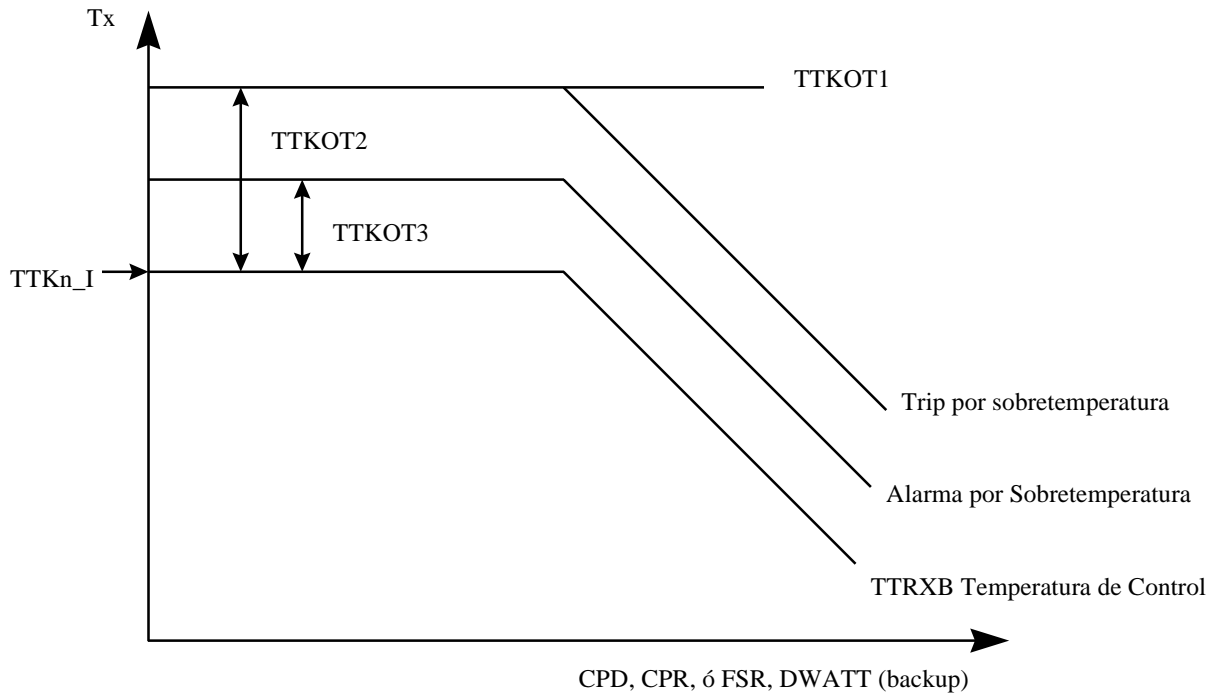
Condiciones que producen un Disparo:

- Si una termocupla excede el valor límite de alto spread (TTHT) y otra termocupla excede el valor límite de bajo spread (TTLT) y el valor de TTXSP1 (SPREAD 1) es mayor que el valor calculado de TTXSPL, se producirá trip de la unidad, energizando la señal lógica L30SPT5.
- Si dos termocuplas adyacentes exceden el valor límite de bajo spread(TTLT) y el valor de TTXSP1 (SPREAD 1) es mayor que el valor calculado de TTXSPL, se produce un disparo de la unidad energizando la señal lógica L30SPT5.
- Si cuatro termocuplas exceden el valor de límite de alto y bajo spread, (TTHT/TTLT) se producirá trip de la unidad energizando la señal lógica L30SPT6.

Observaciones Relevantes para tener en cuenta.

- La señal L83SPM, es activada en por un bloque comparado entre el spread 1 permisible (TTXSP1) y la señal del valor promedio del spread permitido (TTXSPL).
- Para condiciones de monitoreo del spread de la unidad; en el despliegue de barras de las termocuplas de exhosto, aparecen el valor de las señales TTXSP1(spread 1) y TTXSPL(spread permitido). Siempre el valor del spread 1 debe ser menor que el spread permitido.
- En el cálculo para el spread permitido, el algoritmo no descarta las termocuplas que se encuentran abiertas. Esta es la razón que el spread 1 llegue a valores de 1130 F. También para los bloques comparadores TTHA/TTLA/TTLT/TTHT, el algoritmo solo descarta las termocuplas que tengan un valor igual a cero.
- Cuando se presenta daño de una termocupla de exhosto, si otra termocupla llega a bajar o subir por encima de los valores de TTLA o TTHA, se producirá la alarma de “problema de combustión”(L30SPA).
- Cuando se presenta un daño en una termocupla de exhosto, si otra termocupla llega a bajar o subir por encima de los valores de TTLT o TTHT, se producirá disparo de la unidad.(L30SPT5).
- El daño de una termocupla de exhosto, habilita de inmediato la señal L83SPM en los primitivos de alarma y disparo por alto y bajo spread.

CURVA DE PROTECCION POR SOBRETENPERATURA



Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
TTKOT1	1045.00	deg F	TC	TURB O.T. TRIP ISOTHERMAL SETTING
TTKOT2	40.00	deg F	TCDIF	TURB O.T. TRIP-INCREMENTAL TEMP ABOVE ISO.
TTKOT3	25.00	deg F	TCDIF	TURB O.T. ALARM-INCREMENTAL TEMP ABOVE ISO.

Bujías

La combustión de la mezcla de aire / gas combustible se inicia por medio de las bujías con electrodos retráctiles. Dos bujías son instaladas en dos cámaras de combustión, las cámaras restantes que no tienen bujías. Estas son encendidas con la llama que proviene de las cámaras encendidas a través de los tubos cruza llama.

Detectores de llama ultravioleta

Durante la secuencia de arranque, es esencial que la indicación de presencia o ausencia de llama sea transmitida al sistema de control. Por esta razón, un

sistema de monitoreo de llama es usado, y consiste de cuatro sensores y un amplificador electrónico ubicado en el panel de control Mark V.

El sensor de llama ultravioleta contiene un detector lleno de gas, este gas es sensible a la presencia de radiación ultravioleta que es emitida por una llama de hidrocarburo. Un voltaje DC es suministrado por un amplificador a los terminales del detector, si hay presencia de llama, la ionización del gas permite la conductividad del circuito, lo cual activa la parte electrónica para dar una salida que dice si hay o no llama. Después que se confirma la presencia de llama, si una pérdida o falta de llama es detectada por el circuito, este envía una señal al panel de relevos del sistema de protección principal al sistema de control de la turbina y se da la parada de la turbina.

4.2.2.7 Sistema de Protección de Velocidad y Vibración. El sistema de control de velocidad está compuesto por tres pickup magnéticos los cuales se encuentran instalados en el eje de alta (HP) y en el eje de baja (LP). Como consideración de instalación, estos deben estar instalados a una distancia de 40 mils para garantizar una medición adecuada. La frecuencia generada por los pickups magnéticos es directamente proporcional al corte del campo magnético por el diente del piñón. Es decir como la rueda dentada posee 60 dientes. La frecuencia de 60 Hz es el equivalente a 60 vueltas.

La velocidad es una variable crítica para el arranque, parada y trabajo en régimen de la unidad. Estos se encuentran cableados al procesador de protección a las tarjetas TCEA donde se realiza la triple redundancia del sistema. De esta manera si se presenta la falla de un pickup, los otros dos respaldaran la función del sistema para que el sistema de control tome las decisiones adecuadas para mantener la maquina en operación segura.

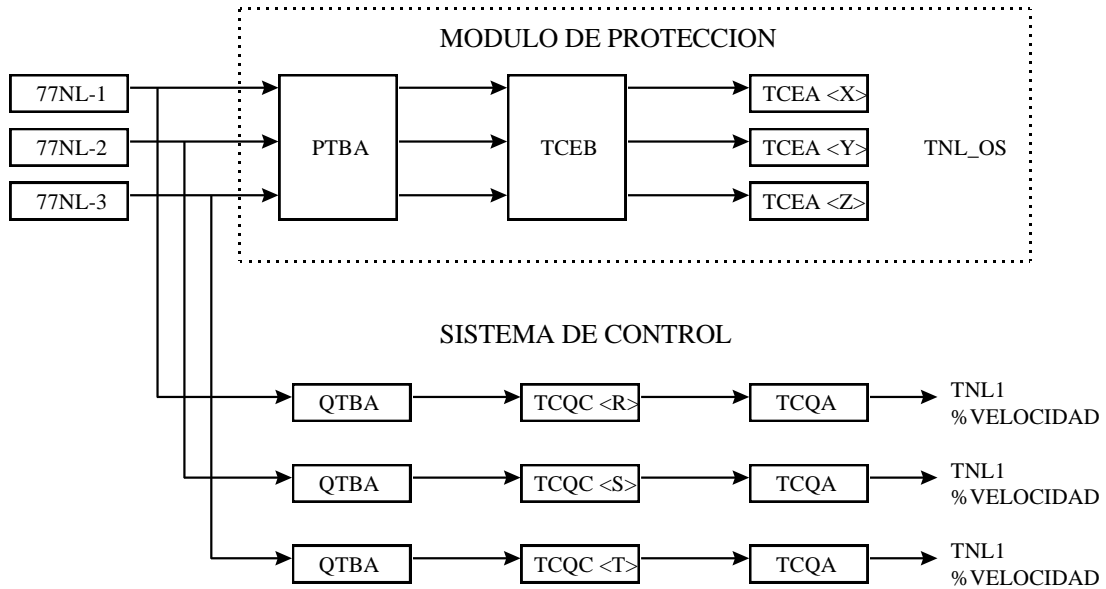
En unidades de generación, el control de velocidad puede ser de caída repentina o isócrona. Con control de caída repentina la demanda de carga es sumada con el setpoint de velocidad. El setpoint de velocidad/carga (TNR) es luego comparado con la retroalimentación de velocidad (TNH) para producir la demanda de flujo de combustible para controlar la velocidad (FSRN). Con el control isócrono, usado comúnmente para operación en islas, el control de velocidad/combustible, mantiene una velocidad constante equivalente a la frecuencia del sistema sobre el rango de carga conectado.

Durante el arranque y aceleración, la referencia de combustible de aceleración limitará la rata de cambio de velocidad.

La protección por sobre velocidad es provista por dos circuitos electrónicos independientes. Los módulos de software L12H que se encuentran en los procesadores <R>, <S> y <T> cortan el suministro de combustible cuando la velocidad medida por los tres sensores de velocidad primarios (77NH-1, 2,3) exceden el límite por sobre velocidad. Adicionalmente el modulo <P> contiene los

procesadores de protección <X>, <Y> y <Z>, los cuales cortan el suministro de combustible cuando la velocidad medida por los tres sensores de velocidad de protección (77NH-4,5,6) exceden el setting sobre velocidad.

CONTROL Y PROTECCION DE VELOCIDAD



Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
TNH1		%	PCT	HP SPEED CALCULATED BY HFPC
TNH_OS		%	PCT	TURBINE OVERSPEED HP

Definición de la rata de pulsaciones de velocidad de la turbina

La señal de velocidad, TNL_PR en HZ, es calculada de la medición de TNL_PLU por un intervalo, dividido por los conteos de reloj en el intervalo. La velocidad en Hz es igual a las RPM con una rueda de 60 dientes.

TNKL1	FULL SCALE
-7	4500 Hz = 32767, CNT15
-6	9000 Hz = 32767, CNT15
-5	18000 Hz = 32767, CNT15

Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
KPN_GAIN	24.00	rpm/%	RPMGN	STARTING DEVICE SPEED CALIBRATION
KTNH_GAIN	51.00	rpm/%	RPMGN	TURBINE SPEED GAIN CONSTANT
KTNI_GAIN	0.00	rpm/%	RPMGN	FSR SPEED CONTROL LEAD TIME CONSTANT
KTNL_GAIN	46.70	rpm/%	RPMGN	LP SPEED GAIN CONSTANT

Control de velocidad de referencia de carrera de combustible.

La acción de control de velocidad es proporcional más integral con banda muerta.

El control integra a partir del error de la velocidad (TNR-TNL).

Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
FSKNG	12.50	%/%	PC7P C	FSR SPEED REF PROP GAIN
FSKNH	12.50	%/%	PC7P C	TNH SPEED CORRECTION COEFICIENT
FSKNTC	2.50	sec	SEC64	FSR SPEED CONTROL LEAD TIME CONSTANT
TNKRNR	104.00	%	PCT	FSR SPEED CONTROL HP OVER-RIDE REFERENCE

Control de Aceleración

Este software limita la tasa de aceleración del eje de baja velocidad LP limitando FSR a FSRACL. FSRACL actúa en la tasa de incremento de velocidad para prevenir la sobre velocidad con rechazo de la carga.

El control de aceleración es usado extensivamente para el arranque. Durante el arranque, el límite de la tasa de aceleración es cambiado por FSKACLR2 cuando

el eje de baja excede aproximadamente el 20% (Seteado por la constante TNKLA1).

Señal	Valor	Unidad s	Escala	Definición
FSKACL2	12.80	%/%/s	PC4P S	LP ACC CONTROL GAIN OFF CONTROL
FSKACLR1	1.00	%/sec	PCT_S	LP ACCELERATION RATE LIMIT 1
FSKACLR2	1.00	%/sec	PCT_S	LP ACCELERATION RATE LIMIT 2

Disparo por sobre velocidad electrónico (EOS) del eje de alta (HP)

Protección electrónica por sobre velocidad es provista por la comparación de la velocidad actual del eje con el setpoint, de sobre velocidad electrónico (TNKHOS). La constante "TNKHOST", provee un backup electrónico para la prueba de sobre velocidad mecánica. Este se encuentra seteado a la máxima velocidad alcanzable permitida.

NOTE: El trip EOS, resetea manualmente la señal L86MR1 (MASTER RESET).

Señal	Valor	Unidad s	Escala	Definición
TNKHDIF	5.00	%	PCT	CONTROL SPEED SIGNAL TROUBLE SETPOINT
TNKHF	5.00	%	PCT	SPEED SIGNAL FAULT
TNKHOS	110.00	%	PCT	OVERSPEED TRIP SETTING FOR HP TURBINE
TNKHOST	113.50	%	PCT	HP OST TEST SETPOINT ADJUST

Disparo por sobre velocidad electrónico (EOS) del eje de baja (LP)

Protección electrónica por sobre velocidad es provista por la comparación de la velocidad actual del eje con el setpoint sobre la velocidad del electrónico (TNKLOS). La constante "TNKLOST", provee un Backup electrónico para la

prueba de sobre velocidad mecánica. Este se encuentra seteado a la máxima velocidad alcanzable permitida.

NOTA: El disparo EOS se resetea manualmente la señal L86MR1 (MASTER RESET).

Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
TNKLDIF	5.00	%	PCT	CONTROL SPEED SIGNAL TROUBLE SETPOINT
TNKLF	10.00	%	PCT	LP SHAFT FAULT DETECTION SPEED LEVEL
TNKLOS	110.00	%	PCT	LP SHAFT OVERSPEED TRIP SPEED LEVEL
TNKLOST	113.50	%	PCT	LP OST TEST CONSTANT

Referencia de velocidad del eje de alta (HP)

La referencia para el seting de velocidad del eje de alta es derivada de la temperatura de exhosto, error de TTXM, entre el control de referencia, TTXR, y la referencia de flujo de aire, TNRHAQ. La acción del control es proporcional más integral. El rango de operación se encuentra limitado por la alta y baja velocidad de parada, donde la velocidad de parada baja es corregida por la temperatura ambiente, CNRF. Si el eje de alta (HP) cae por debajo de TNKRHLSS a TNKRNLSS (también corregida), TNR es aumentado para causar que el eje de baja (LP) acepte la carga. Esto es realizado para evitar que el eje de alta ruede en la región de surge.

TNKRHLSS debe ser seteado sobre TNKHHSS para operar en un sistema de ciclo simple.

Señal	Valor	Unidades	Escala	Definición
TNKRHG	0.022	%/F	PCT6T	(AVG - REF) + OFFSET GAIN FACTOR (F->%)
TNKRHHSS	100.00	%	PCT	HP TURBINE SPEED REFERENCE MAX LIMIT

TNKRHLSL	82.50	%	PCT	HP TURBINE SPEED REFERENCE LOW SPEED LEVEL (STARTUP)
TNKRHLSS	99.00	%	PCT	HP TURBINE SPEED REFERENCE MIN LIMIT
TNKRHO	0.00	deg F	TC	(AVG - REFERENCE) OFFSET FACTOR
TNKRHTC	4.00	sec	SEC64	TNRH LAG TIME CONSTANT

El sistema de vibración sísmica son sensores piezoeléctricos instalados en carcasa del cojinete No 1 y No 4. Estos se encuentran instalados de a par en cada carcasa. Cualquier cambio en el desempeño mecánico de la maquina como perdida de aceite, desbalanceo, desgaste de cojinetes puede ser reflejado indirectamente en vibración de la carcasa. Este concepto es utilizado por la razón de que la masa del eje es superior a la carcasa. Estas señales son transmitidas eléctricamente al sistema de control el cual procesa la información donde tiene definidos unos niveles de alarma y disparo de la maquina.

4.2.2.8 Sistema de Enfriamiento y Ventilación. El sistema de enfriamiento es tomado del compresor axial de la turbina, el cual genera una corriente de aire que es extraída de la decima etapa. Dicha corriente pasa por un filtro separador. Cuando la unidad arranca las bleed valve se mantienen abiertas para fluir la mayor parte del aire al exhosto y así evitar que la máquina entre en surgencia. Cuando el relex de velocidad L14HS es activado al 95% de velocidad, el sistema de control envía una señal eléctrica a la electroválvula L20CB para permitir el paso de aire a los actuadores de las bleed valve y producir el cierre de las mismas.

El mismo aire tomado de la decima etapa del compresor es utilizado para enfriar los cojinetes de la maquina; de esta manera se garantiza la integridad mecánica de los cojinetes y partes fijas mecánicas.

Las partes de la turbina que son refrigeradas con aire son: Rueda de turbina de primera y segunda etapa. El nozzles de primera etapa y el ensamble del anillo retenedor. Carcasa del rotor de la turbina. Plenum de exhosto y soportes del barril interior. Las camisas de las cámaras de combustión, codos y piezas de transición son diseñadas para utilizar el aire de combustión para refrigerarse efectivamente.

El aire de la décima etapa del compresor axial es usado para sellar los cojinetes 1, 3 y 4 y de esta manera evitar que haya pérdida de aceite. El aire es venteado de los cojinetes hacia el tanque de aceite lubricante a través de las tuberías de drenaje. Este aire es utilizado también para refrigerar los espacios entre ruedas.

Adicionalmente este aire es conducido por tuberías hasta manifold y usado para refrigerar la carcasa de la turbina, el Plenum de exhosto y los soportes del barril interior.

Antes de que el aire sea conducido por tuberías hasta los cojinetes 1, 3 y 4, este primero pasa a través de un separador de aire centrífugo, el cual remueve cualquier partícula extraña que pueda causar serios daños a los cojinetes. El separador es limpiado por un orificio de Blow Down continuo.

El cojinete 2 es sellado por aire que fuga del sello de alta presión del compresor axial, el cual; rodea la cubierta de la chumacera en la carcasa de la descarga del compresor y en la cavidad del marco de la turbina. Este aire también se ventea desde la chumacera al tanque de aceite lubricante por la tubería de drenaje. El aire también se utiliza para enfriar el espacio de la turbina delantera en la turbina de primera etapa. Adicionalmente este aire de escape se utiliza para sellar la vía del gas si el escape pasa a través de los sellos de la turbina de la primera etapa a la corriente de gas de combustión.

4.2.2.9 Sistema de Fire & Gas. El sistema de la turbina a gas está provisto de un sistema de protección contra fuego, conformado por detectores ultravioleta, detectores de gas, boquillas para inyección de CO₂ y cilindros para su almacenamiento. El sistema consta de los siguientes componentes.

DETECTORES DE LLAMA, 2 de 3 compartimento Accesorios
DETECTOR DE INCREMENTO TERMICO, 2 Accesorios, 4 Turbina, 2 Acople
DETECTORES DE GAS, 2 Accesorios, 2 Turbina, 3 Casa de Filtros
BOTELLAS DE CO₂, 2 Bancos c/u 5 botellas, 40 Kg. de CO₂ a 750PSI, con peso total de 105-110 Kg.

En caso de FUEGO, si se activan 2 UV ó un sólo detector de incremento térmico, se produce descarga de CO₂, apagando los ventiladores de enfriamiento de los compartimientos BT1/2, cierre los Dámperes de entrada y salida para contener el CO₂ y evitar entrada de aire y finalmente produce el disparo de la turbina.

CONCENTRACION DE GAS, al presentarse un 20 % de LEL alarma, arranca el ventilador que se halla en Stand By.

Al darse la condición del 40 % de LEL, se dará disparo de turbina y también se arranca de ventilador de Stand By.

En el compartimento de accesorios de la turbina están instalados los siguientes instrumentos:

Dos detectores el 45UV-1, 45UV-2 y 45UV-3 , dos detectores de fuego 45FA-1 y 45FA-2, dos detectores de gas 45HA-1 y 45HA-2, tres boquillas para descargue inicial de CO₂ y tres boquillas para descargue prolongado. También están

instaladas la bocina de alarma (corneta) XA-1, los botones de parada de emergencia 5-ESD-1-2 y las lámparas de encendido XLA-1.

En la parte exterior de este compartimento están localizadas las lámparas de encendido: de control automático X4-1 color amarillo, control manual de color blanco XW-1, del sistema en operación (CO₂) disparado color rojo XR-1 y de condición inhibida color verde XG-1.

En el compartimento de turbina están localizados los detectores de fuego 45FT-1-2-3 y 4, los detectores de gas 45HT-1-2, tres boquillas para descargue inicial de CO₂ y tres boquillas para descargue prolongado.

En la parte exterior de este compartimento están instalados dos botones de parada de emergencia 5-ESD-3-4 y la lámpara de encendido XLT-1. En el compartimento de acople de la turbina están localizados dos detectores de fuego 45FT-5 Y 6 y una boquilla para descargue inicial de CO₂ y una boquilla para descargue prolongado.

En la parte exterior están localizadas las lámparas de control automático color amarillo XY-2 , de control manual color blanco XW2 del sistema en operación , disparo del CO₂ de color rojo XR-2 y de condición inhibida color verde XG2.

Este sistema de protección de fuego de la turbina a gas protege los tres compartimentos (accesorios, turbina y acople).

En el patín 43CR1 están montados los cilindros de CO₂ identificados como 33CR-1 al 33CR-10. Estos cilindros están provistos de cuatro válvulas solenoides para disparo del CO₂ ,45CR-1-2-3 y 4 las cuales son actuadas por los detectores de fuego de los compartimentos de la turbina.

En la tubería de distribución de CO₂, a las boquillas de descargue inicial esta instalado el switch de presión 45CP.

Tres selectores de posición complementan los instrumentos localizados en el patín de CO₂, el HS-1 selector automático manual, el HS-2 selector banco principal o el de reserva y HS-3 selector para inhibición del sistema.

El sistema de protección de fuego extingue fuegos reduciendo el contenido de aire en el compartimento de una atmósfera normal de 21%, hasta menos del 15% concentración insuficiente para soportar la combustión.

Para reducir el contenido de oxígeno una cantidad de CO₂ igual o mayor del 34% del volumen del compartimento se inyecta al compartimento en un minuto y, reconociendo el potencial de reincidencia del encendido cuando, los combustibles se exponen a metales a altas temperatura, esto proporciona una descarga

amplia para mantener una concentración de extinción por un periodo prolongado para minimizar la probabilidad de una condición de peligro.

Los cilindros de CO₂, tuberías, boquillas, válvulas, pilotos de solenoide y detectores de fuego cumplen los requisitos de la norma NFPA boletín 12.

4.2.2.10 Sistema de Enfriamiento de Turbina. La ventilación de los tres compartimientos de la turbina (Accesorios, Turbina, Acople) son enfriados por una corriente de aire inducido por dos blower movidos por motores eléctricos L88BA-1, L88BA-2. Los compartimientos cuentan cada uno con dámperes de salida el cual permanecen abiertos (3 dámperes) L33DO-1, L33DO-2, L33DO-3 y dos de entrada uno para cada blower L33DI-1, L33DI-2. Estos dámperes son cerrados automáticamente por unas válvulas accionadas a presión cuando se produce la descarga de CO₂ para confinar los compartimientos y permitir rápidamente la extinción de fuego.

EL compartimiento de turbina cuenta con dos switches de temperatura. El L26BA para producir una alarma y el L26BT para producir el disparo de la maquina por alta temperatura.

5. METODOLOGIA

Para desarrollar el FMECA primero se desarrollará un FMEA y posteriormente el análisis de la Criticidad. Es decir el FMECA es la base para realizar el análisis de criticidad. El propósito de conocer el esquema de cómo se desarrolla un FMECA es para que pueda ser desarrollado de una forma sistemática y estructura para el logro del proyecto.

Es de entender que el equipo el cual vamos a evaluar tiene incorporado diferentes sistemas redundantes utilizados para alcanzar una extrema confiabilidad del sistema para garantizar la función del equipo mayor. En este caso El Turbocompresor.

Para Establecer un ranking de los efectos de cada componente del sistema. El método utilizado para definir este ranking fue recopilado del estándar TM-5-698-4. Este método incluye una fácil evaluación para definir la criticidad de los efectos de falla con base a una Ocurrencia y severidad y un factor que agrega el método de detección. Con base a esta resultado se debe establecer los Métodos de Compensación y los Métodos de Detección. Adicionalmente se proyectara la probabilidad de eventos no deseados para el cual se definirán acciones correctivas.

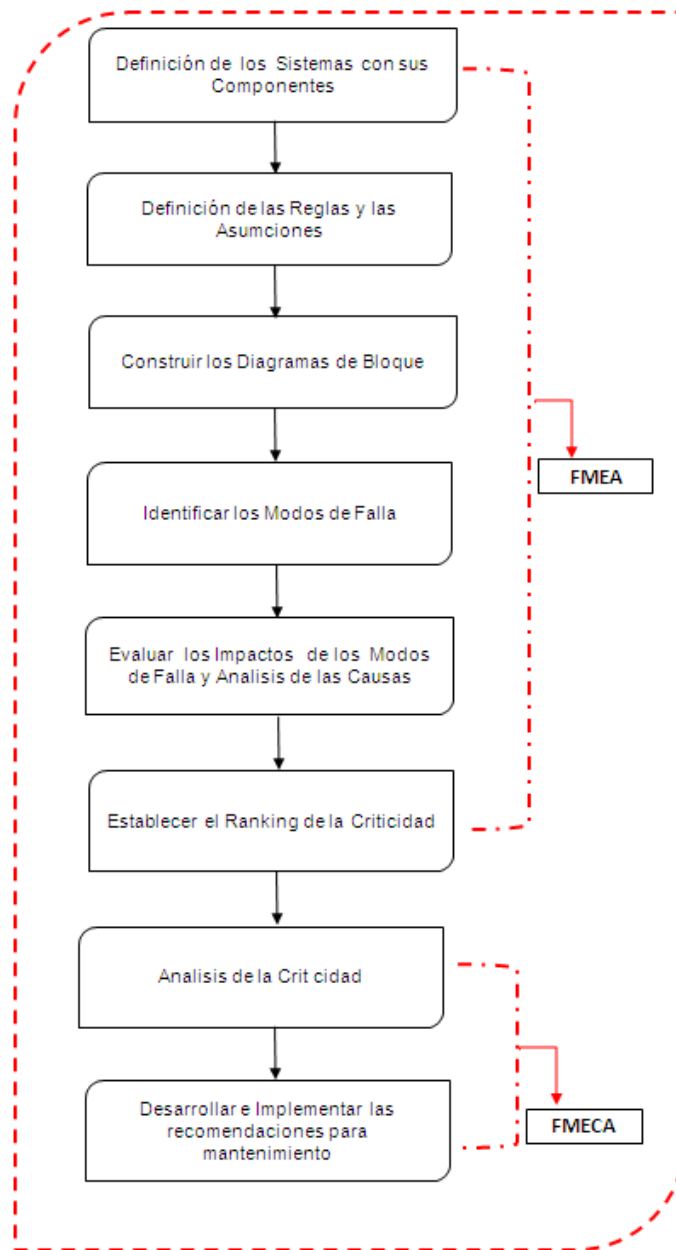
El FMEA identifica los Subsistemas, los componentes y sus modos de fallas asociadas. Esta parte del análisis podrá suministrar la evaluación de la causa de los efectos y cada modo de falla.

El análisis de Criticidad es la base para determinar las acciones preventivas para mitigar los efectos de la falla.

En el diagrama se muestra los pasos para realizar el FMECA de un sistema al más alto nivel y al más bajo nivel.

Pasos para el éxito del FMECA

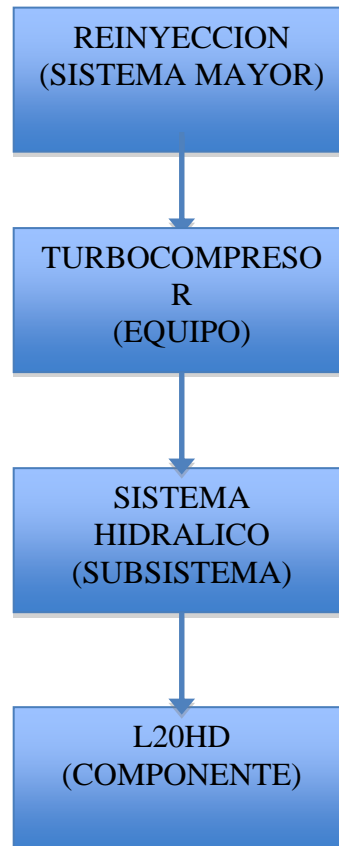
Figura 11: Pasos para desarrollar un FMECA



5.1 Definición De Los Sistemas. Se debe suministrar los diagramas esquemáticos y el detalle operacional de cada uno de los subsistemas y sus componentes. Los sistemas tienen que ser estructurados e identificados. Es decir desarrollar la Taxonomía del equipo mayor. Se utilizará como guía el estándar ISO 14224. Se hace la claridad que la jerarquización se llevará al nivel

mas bajo de un ítem mantenible. El esquema inferior se muestra un ejemplo de la Jerarquización.

Figura 12. Árbol para definición de Taxonomía en el Turbocompresor



El análisis de FMECA se puede desarrollar en la etapa temprana para minimizar el impacto de las fallas críticas de los sistemas y subsistemas. Regularmente en esta etapa no son conocidos a profundidad. Si se desarrolla el FMECA durante la etapa de operación se pueden obtener beneficios el cual pueden impactar directamente la disponibilidad y confiabilidad de los equipos mejorando las metas establecidas.

El análisis de los modos de falla y sus efectos es completado para determinar la falla potencial y las causas de cada componente. Como se mencionó anteriormente los componentes redundantes no considerados de bajo nivel. En

análisis debe ser realizado completamente para determinar las fallas potenciales y las causas de los modos de falla de cada sistema y componente.

5.2 REGLAS BASICAS & SUPUESTOS

Para tener claridad de cómo entender el desarrollo del FMECA y los resultados. Este debe ser claramente documentado con reglas y supuestos (Los supuestos en este caso como el equipo ya se encuentra en operación. El Juicio de expertos cobra alto valor para el desarrollo del ejercicio) cuando se realiza cada parte del análisis.

El análisis debe tener un comité de evaluación para el logro de los objetivos. Las reglas básicas definidas son las siguientes.

- ❖ El principio de operación del ítem a ser analizado.
- ❖ El desempeño de los componentes. Si trabajan continuamente u operan en demanda.
- ❖ El índice de severidad a ser definido para los efectos de falla.
- ❖ Desviaciones de los modos de falla. (Algunos definidos por el fabricante del equipo el cual se deben tener en cuenta durante el desarrollo del análisis.
- ❖ La detección de los modos de falla y las metodologías a utilizar (Sistemas Supervisorio, Rutas del Operador, Tendencias, Alarmas, Eventos).

5.3 DIAGRAMAS DE BLOQUE

Diagramas de Bloques funcionales son utilizados para representar la operación, la interrelación y la interdependencia de la función de cada uno de los sistemas. Los diagramas de bloque poseen la facilidad de hacer seguimiento a los modos de falla en cada nivel de la jerarquización del sistema. Los diagramas de bloque, la secuencia del flujo como una serie o paralelo dependiente o independiente de la función y de la operación.

Cada ítem de entrada y salida deberá ser mostrado sobre el diagrama e identificado. Un número consecutivo debe ser asignado para cada sistema a ser desarrollado para poder realizar el seguimiento durante el desarrollo del ejercicio. Los diagramas de bloques muestran la operación y la interrelación entre los componentes funcionales y los sistemas definidos por los diagramas esquemáticos o P&IDs. Estos representan el sistema funcional, la jerarquización del análisis y la jerarquización de los componente físicos.

Figura 13. Diagramas de Bloque No 1

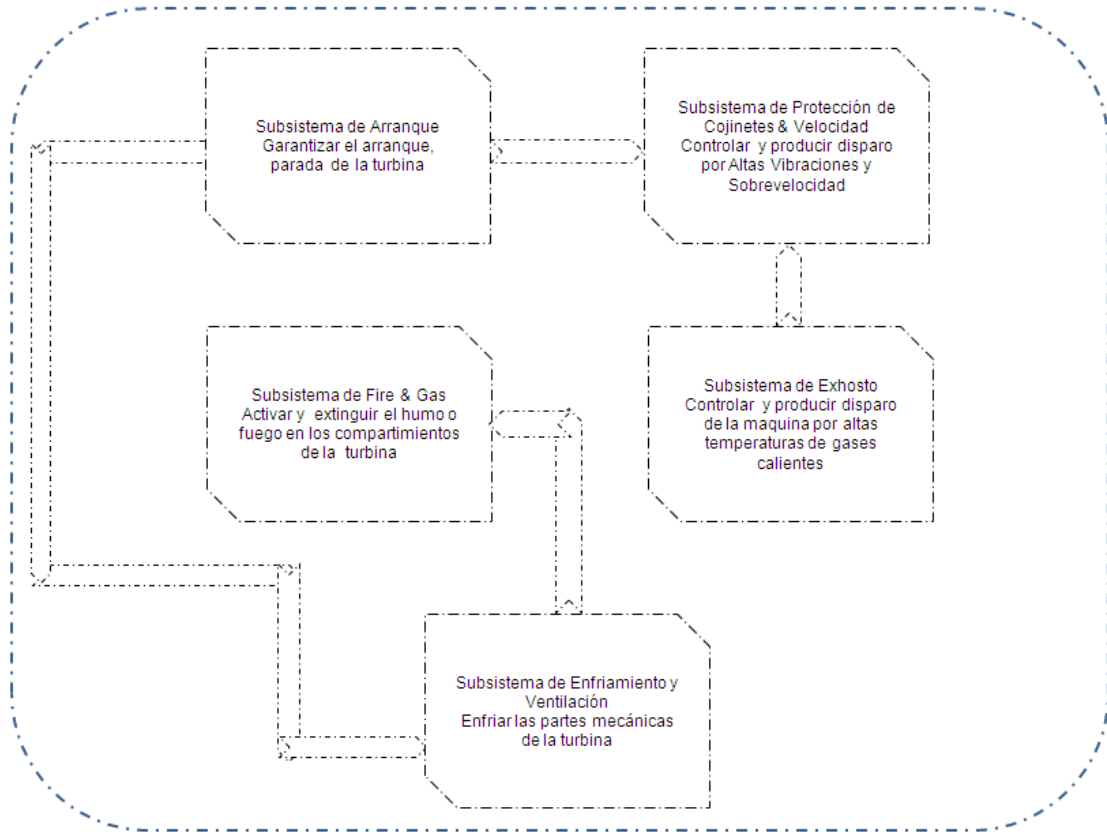
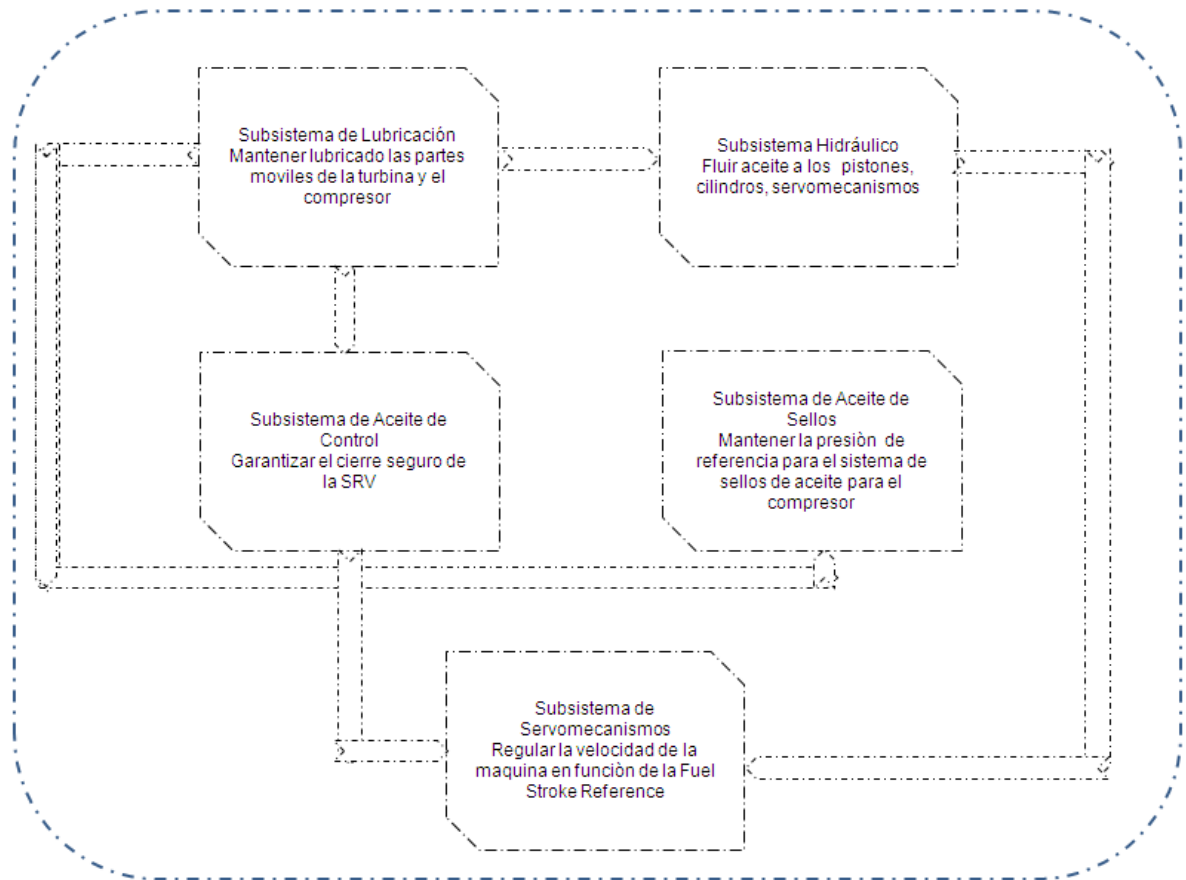


Figura 14. Diagramas de Bloque No 2



5.4 IDENTIFICACION DE LOS MODOS DE FALLA.

La causa de los mecanismos de falla y los modos de falla es el proceso físico o químico que causa que un ítem falle. Es importante notar que más de una causa de una falla es posible para un modo de falla dado. Todas las causas deberán ser identificadas incluyendo las causas humanas inducidas. Este tipo de causa ocurre inicialmente al inicio de la operación por falta de conocimiento del equipo o cuando los sistemas son redundantes como en este caso las fallas se pueden convertirse en fallas ocultas. Cuando se realice el análisis la causa de cada modo de falla se debe ser muy cuidadoso para evitar sobre análisis de porque falló el componente o sistema para evitar argumentos que no fundamenten el desarrollo del FMECA y no se logre el éxito del ejercicio.

Los Modos de Falla y el Mecanismo de Falla (La manera que es observada la falla) fue establecida con base a la ISO14224, Esto facilita la unificación de conceptos y códigos para la estructura de la información. Hay muchos modos como los sistemas y componentes pueden fallar y dependen básicamente de las especificaciones de los componentes, su construcción, la calidad, la rata de trabajo, el medio en el cual se encuentra y la experiencia de los hechos ocurridos anteriormente con componentes o sistemas similares. Todos los modos de falla deben ser identificados independientemente para cada componente identificado.

Para asegurar que el análisis completo ha sido exitoso. Cada modo de falla de cada componente debe ser evaluado como una función de entradas y salidas para las siguientes condiciones.

- ❖ La falla hace que el componente no opere en un tiempo determinado
- ❖ La falla hace que se produzca perdida de la función de manera intermitente.
- ❖ La falla hace que se pierda la función del equipo o componente
- ❖ Degradación de la salida o reducción de la capacidad operacional.

5.5 ANALISIS DE LOS EFECTOS DE FALLA

En análisis de los efectos de falla es realizado para cada ítem mantenible de cada sistema definidos en los diagramas de bloque. La consecuencia de cada modo de falla sobre la operación de cada ítem y cada sistema deben ser identificados y registrado en los formatos descriptivos y la hoja de trabajo del FMECA. Las fallas no considerables o de efectos menores deben ser consideradas ya que estas se pueden repetir en diferentes niveles de la jerarquización.

Los efectos de falla deben ser considerados como un objetivo para entender los requerimientos de mantenimiento de los componentes, sistemas, la seguridad del personal y la seguridad de los procesos.

5.6 COMPENSACION DE PROVISIONAMIENTO

La compensación de provisionamiento son las acciones que toma el operador para minimizar los efectos de la falla sobre el sistema o componente. Una acción de compensación crea dentro del sistema que puede anular o minimizar los efectos de mal funcionamiento o fallas que deben ser identificadas. Un ejemplo es cuando se presenta una alarma en un sistema de control. Se puede valorar la consecuencia y establecer medidas por el operador para evitar que la falla trascienda. Otro ejemplo son los sistemas automáticos que compensan la

disminución del desempeño, como por ejemplo un variador de velocidad, la baja de frecuencia en un generador. Es de aclarar que las acciones también pueden ser manuales.

Cuando múltiples compensaciones existen. La mejor compensación debe garantizar que la falla observada por el operador debe ser fijada o controlada. La respuesta de que el operador tome una acción incorrecta significa que no se ha logrado controlar la falla. Las acciones de compensación deben ser registradas en el formato estándar y formato descriptivo para el desarrollo del FMECA.

Cuando se detecta una falla crítica el cual la acción correctiva debe ser extremadamente crítica que afecta la disponibilidad del sistema. Por ejemplo una bomba que no levanta la presión de aceite hidráulico para mantener el sistema dentro de parámetros operativos. La acción del operador es garantizar el arranque manual o automático de la bomba auxiliar de respaldo para lograr estabilizar el sistema. Valorar las consecuencias y el resultado de la severidad para tomar posteriormente las acciones correctivas para restablecer la función total del sistema. En síntesis esta es la forma estándar pero podrá ser considerado en el análisis sobre todos los modos de falla.

5.7 EVALUACION DE LA SEVERIDAD

Después que los modos de falla y sus efectos sobre el sistema han sido documentados en el FMEA. Ahora nos concentraremos en determinar un ranking para los defectos de cada modo de falla. Para este ejercicio debemos asegurar que la prioridad de asignación de este ranking en el formato. Es de suma importancia con el Juicio de los expertos realizar una valoración profunda y consiente ya que el resultado es la base para establecer las acciones preventivas y los métodos de detección de las fallas.

Cada ítem debe ser evaluado en términos de la consecuencia potencial del sistema el cual dará como resultado desde la falla inicial. La clasificación de la severidad debe ser asignada para cada nivel de efecto del sistema. Un indicador de ranking bajo indica una menor severidad en el efecto de la falla. Un ranking más alto indica una mayor severidad en los efectos de la falla. La Clasificación de la severidad es asignado para cada modo de falla identificado y cada ítem analizado en concordancia con las siguientes categorías en la Tabla 1.1.

Tabla 3. Evaluación de la Severidad

Ranking	Efecto	Descripción
1	Ninguno	No Hay argumentos para esperar una falla que tenga un efecto en la seguridad, Salud, Medio Ambiente o la Función del equipo
2	Bajo	Menor Interrupción en la Función. La reparación puede ser realizada durante la identificación de la falla.
3	Moderado	Moderada Interrupción de la función. Puede presentar impactos en el desempeño del sistema
4	Moderado Alto	Pérdida parcial de la función. Se puede presentar impactos en el desempeño del sistema. Se presentara impacto directo ya que se necesita restaurar la función.
5	Alto	Perdida de la función. Significa perdida del sistema. Impacto en el equipo y tiempo significativo para restaurar la función.
6	Peligroso	Impacto Potencial en la seguridad de los procesos, Medio Ambiente. Se pierde totalmente la función del equipo.

La tabla en mención será utilizada para el análisis cualitativo (sin datos) o análisis cuantitativo (con datos). Se puede desarrollar otros métodos o categorías para la asignación de otro formato para la clasificación y análisis de la severidad.

El análisis de la probabilidad debe ser evaluado por aparte con la siguiente tabla. Tabla 1.2. La Severidad y la Probabilidad de ocurrencia nos darán como resultado en análisis de la criticidad del equipo, sistema o componente.

Tabla 4. Análisis de la probabilidad

Categoría	Efecto	Descripción
I	Menor	Una falla menor no causa lesiones a las personas, daños a la propiedad o daños al sistema por el cual puede resultar en reparaciones o cambio en el plan de mantenimiento.
II	Marginal	Una falla el cual puede causar lesiones menores, daños menores a la propiedad o daños menores al sistema el cual resulta en retardos o pérdida de la disponibilidad o degradación de la función del equipo.
III	Critico	Una falla el cual pueda causar lesiones severas o daños mayores al sistema el cual resulta en pérdida de la función del equipo y como consecuencia una pérdida de tiempo significativo para restaurarlo.
IV	Catastrófico	Una falla el cual pueda causar muertes o pérdida total de la función del equipo y como resultado cambio total el mismo.

El desarrollo de la fase del FMEA debe tener en cuenta que el nivel de severidad se establece hasta los niveles más altos, partiendo del concepto que el sistema no es redundante. Para sistemas redundantes el nivel de severidad tiende a disminuir debido a que la pérdida de un componente en sistema cuenta con Backup el cual debe operar en demanda cuando sea necesario, por lo tanto se puede perder la función del componente que falla pero no la función de sistema. Para tal caso se hace necesario realizar las anotaciones del caso que queden resaltadas para asegurar las razones del análisis para la valoración posterior del FMECA.

5.8 RESULTADOS DEL FMEA

Con la evaluación realizada del equipo, sus sistemas y componentes. Debemos realizar una nueva valoración para determinar si se hace necesario reevaluar el ejercicio y hacer algún cambio. Debemos tener en cuenta que la adicción de un modo de falla de un componente o sistema se debe valorar la severidad y la probabilidad de ocurrencia.

Ahora con la información evaluada y analizada nos dará como resultado el FMEA. Ahora realizaremos el segundo paso que es realizar el análisis de criticidad.

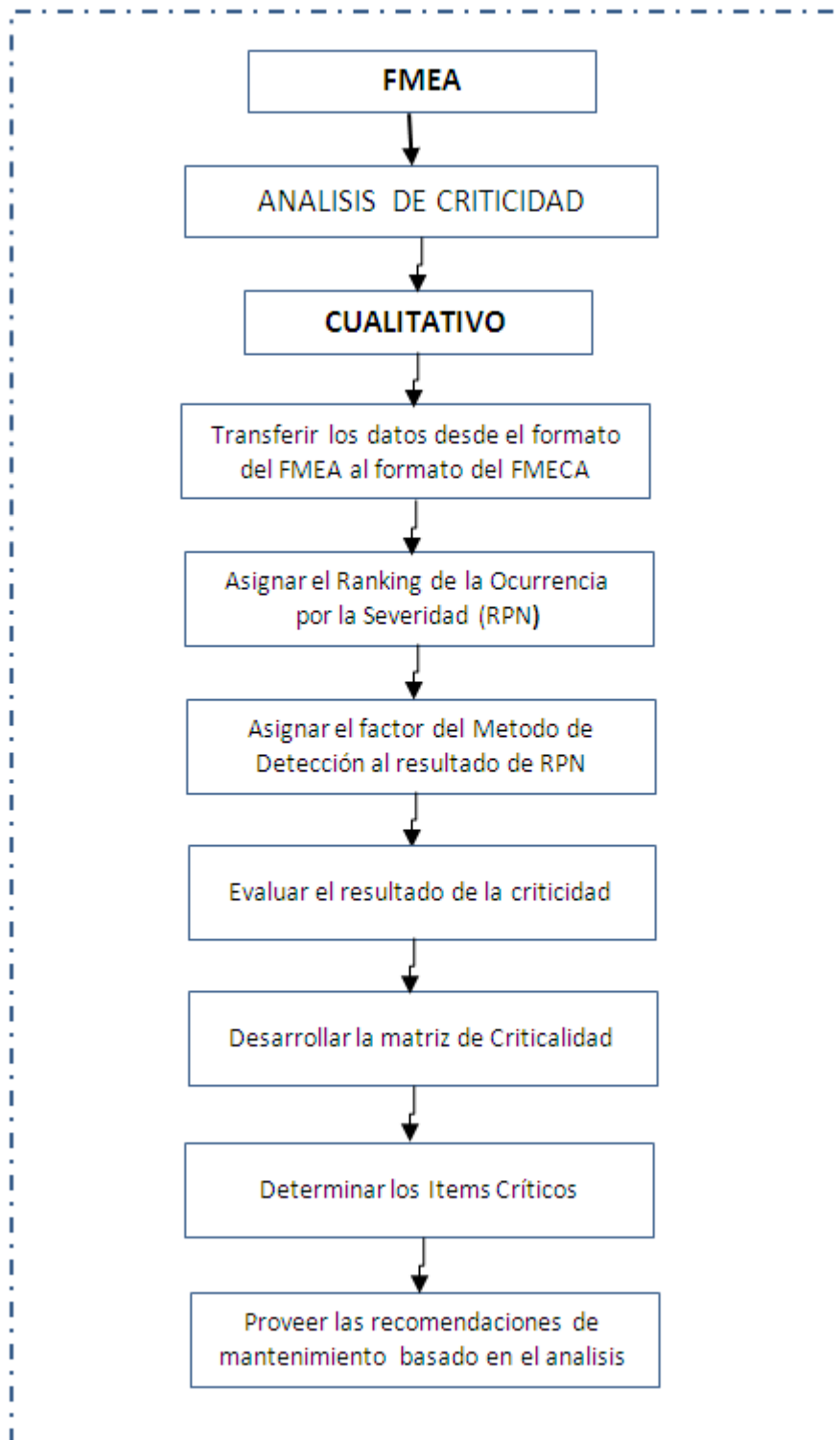
El formato del FMECA es utilizado para desarrollar todo el ejercicio. Como soporte y como entregable se ha desarrollado el formato descriptivo para valorar individualmente cada componente.

5.9 ANALISIS DE LA CRITICIDAD

El análisis de la criticidad provee una medida relativa de la significancia del efecto del modo de falla. Así como la significancia de un componente o sistema sobre la seguridad, la operación y la función del equipo. En esencia la Criticidad es una herramienta que determina un ranking de cada falla potencial por cada componente en el sistema basado en la tasa de falla y el ranking de severidad. Esta herramienta o técnica es utilizada para priorizar y minimizar los efectos de las fallas críticas sea en el diseño temprano o durante la fase de operación apoyándose en el juicio de expertos. El Análisis de Criticidad puede ser realizado cuantitativamente o cualitativamente.

El enfoque depende del nivel de información disponible. El análisis debe determinar cuál enfoque debe ser utilizado para el análisis. Como la tasa de falla en instrumentación no es alta; no significa que la estrategia actual sea la adecuada. El sobre mantenimiento también genera sobrecostos que impactan directamente la gestión de mantenimiento. Con base a esta premisa y valorando la experiencia del personal (Juicio de expertos), se tomó la decisión de usar el análisis cuantitativo.

Figura 15: Diagrama de bloques análisis de la criticidad (Método Cualitativo)



5.10 ANALISIS CUANTITATIVO

El análisis cuantitativo lo utilizaremos basado en la experiencia del personal especializado de instrumentación y control. Este análisis podrá permitir al líder del FMECA la decisión de realizar un ranking que puede estar definido con base a cada modo de falla, al nivel de severidad en relación con la probabilidad de la falla. La información desde el FMEA puede ser valorada en las siguientes columnas donde se podrá calcular en número del valor del Riesgo (RPN Risk Priority Number), el cual será explicado en detalle.

El valor del RPN puede ser combinado con un factor para disminuir el riesgo. Puede ser utilizado la redundancia de los componentes o el método de detección del sistema a las fallas. Para nuestro caso utilizaremos el factor del método de detección.

El ranking de ocurrencia (O): Es un método utilizado subjetivamente para asignar un valor numérico a una tasa de falla de un componente. Cada paso en el ranking obedece a una tasa de falla determinada basado en el análisis y la experiencia con equipos similares utilizados en el mismo ambiente.

El valor más bajo indica la menor ocurrencia de falla. La clasificación de la Ocurrencia evalúa la tasa de falla de un componente o sistema. Este valor si se cuenta con información estructurada puede ser calculado con valoración cuantitativa.

Este valor puede determinar la probabilidad de falla cualitativa el cual será documentado en la casilla Ocurrencia (O).

El ranking de Ocurrencia es mostrado en La siguiente tabla.

Tabla 5. Definición de la Ocurrencia

Ranking	Rata de Falla (λ) Horas	Criterios: Ranking de la Ocurrencia de AMEF (O)
10	1/125	Muy Alta Rata de falla. Causa problemas siempre
9	1/250	Muy Alta Rata de falla. Causa problemas casi siempre
8	1/500	Alta Rata de falla. Causa problemas casualmente
7	1/750	Moderada Rata de Falla. Puede causar problemas ocasionalmente
6	1/1500	Ocasional Rata de Falla. Puede disminuir la función del equipo o componente
5	1./3000	Baja Rata de Falla:
4	.1/6000	Muy Baja Rata de Falla.
3	1/12000	Remota probabilidad de Rata de Falla
2	1/25000	Irrazonable probabilidad de Rata de Falla
1	1/50000	Irrazonable probabilidad de Rata de Falla

El ranking de Severidad (S): Es el otro método utilizado para determinar la cantidad relativa a los modos de falla, que es reflejado en la consecuencia o impacto de la falla que puede generar en el componente o el sistema. La severidad es valorada como la consecuencia potencial del sistema, el cual se puede generar desde el nivel más bajo que es el componente. Una clasificación de Severidad debe ser asignada a cada componente. El valor más bajo indica el menor efecto o causa. La clasificación de la severidad provee una medida cualitativa de la consecuencia potencial resultante de una falla de un componente.

Este valor puede determinar la probabilidad de la falla cualitativa. El cual será documentado en la casilla Ocurrencia (O).

El ranking de Severidad es mostrado en La siguiente tabla.

Tabla 6. Definición del Ranking de Severidad

Ranking	Efecto	Criterios: Severidad del efecto para AMEF (S)
10	Alerta peligrosa	El incidente afecta la operación segura del producto o implica la no conformidad con la regulación del gobierno sin alarma.
9	Peligroso, con alarma	El incidente afecta la operación segura del producto o implica la no conformidad con la regulación del gobierno con la alarma.
8	Muy Alto	El producto es inoperable con pérdida de función primaria.
7	Alto	El producto es operable, pero en el nivel reducido del funcionamiento.
6	Moderado	El producto es operable, pero el ítem(s) de la comodidad o de la conveniencia es inoperable.
5	Bajo	El producto es operable a un nivel reducido de funcionamiento.
4	Muy Bajo	La mayoría de los clientes notan los defectos.
3	De menor importancia	Los clientes medios notan los defectos.
2	Muy De menor importancia	El ajuste y el final o el chirrido y el ítem del traqueteo no se conforma. Los clientes exigentes notan los defectos.
1	Ninguno	Ningún efecto

5.11 FACTOR DE DETECCION

Este método complementario fue desarrollado por la Auto motive Industry Action Group (AIAG) y se encuentra referenciado en el manual titulado “Potencial Failure Mode and Effect Analysis”. El método establece un ranking similar a la ocurrencia y la severidad.

El ranking del factor de detección es mostrado en la siguiente tabla..

Tabla 7. Definición factor de detección

Ranking	Detección	Criterios: Métodos de Detección (D)
10	Imposible	El control es imposible que detecte el modo de falla.
9	Muy Remoto	El control tiene muy remota probabilidad de predecir el modo de falla
8	Remoto	El control tiene remota probabilidad de predecir el modo de falla
7	Muy Bajo	El control tiene muy baja probabilidad de predecir el modo de falla.
6	Bajo	El control tiene baja probabilidad de predecir el modo de falla.
5	Moderado	El control tiene moderada de predecir el modo de falla.
4	Altamente Moderado	El control tiene altamente moderada de predecir la falla.
3	Alto	El control tiene alta probabilidad de preceder el modo de falla.
2	Muy Alto	El control tiene muy alta probabilidad de preceder el modo de falla.
1	Siempre	El control tiene la capacidad de detectar el modo de falla. Alta confiabilidad para detectar la falla.

5.12 CALCULO DE LA CRITICIDAD

El método cuantitativo determina la criticidad determinando el valor del Riesgo (RPN), multiplicando la ocurrencia por la Severidad.

$$RPN = (O) \times (S)$$

El valor hallado es multiplicado por el factor de Detección de la falla. (D) para obtener finalmente el valor a dimensional de la criticidad.

$$C = RPN \times (D)$$

5.13 RANKING DE LA CRITICALIDAD

Un ranking de criticalidad es usado para establecer los niveles de criticidad asociados a los modos de falla. Este requerimiento busca establecer a criterio de los expertos para determinar las acciones de mantenimiento a tomar, las frecuencias, el nivel de profundidad de la intervención. Como todo equipo que cumpla una función la posibilidad de una falla existente, por lo tanto también ayuda a definir acciones correctivas en caso que el componente presente una falla potencial.

Cabe la posibilidad que componentes diferentes con funciones diferentes estén definidos dentro del mismo ranking de criticidad, pero con acciones de mantenimiento diferentes. Nuevamente la experiencia del personal cobra importancia para establecer las acciones de mantenimiento y aprovisionamiento.

5.14 RESULTADOS DEL FMECA

Las conclusiones del FMECA deben estar fundamentadas en determinar las acciones preventivas y de aprovisionamiento que eviten que los modos de fallas escalen, desde un componente a un sistema o daño mayor del equipo basado en la criticidad.

Los componentes que el resultaron en una criticidad alta y afectan directamente al sistema u otros sistemas deben ser analizados para determinar acciones de mejora que disminuyan el impacto y la seguridad de los procesos.

En el anexo D se resume el plan de mantenimiento propuesto del resultado del ejercicio del FMECA.

5.15 FORMATO DEL FMECA

La información desde el formato del FMEA será utilizado para desarrollar el FMECA, el cual se le agregaran las casillas para evaluar la Criticidad.

Como se mencionó anteriormente por lo complejo para interpretar la información del FMECA, esta será desglosada en una hoja de datos para cada componente y así poderla interpretar y evaluar correctamente. Esta es una de las dificultades que se debemos flexibilizar para el desarrollo del ejercicio y lograr los objetivos del análisis.

Figura 16: Figura del Formato del FMECA

FORMATO DESCRIPTIVO FMECA							
SISTEMA	Turbocompresión		CONSECUTIVO	FMECA-INS-001			
EQUIPO	KTB-1801		DESCRIPCIÓN	Turbocompresor de Media Presión			
SUBSISTEMA	Sistema Hidráulica		PI&D	Schematic Diagram Hydraulic Supply SOM-03481/3			
Item Mantenible	CB-L20CS Electroválvula de control del Clutch (solo en turbinas 5002C)						
PRINCIPIO DE OPERACIÓN	<p>Válvula de dar paracionar, una de ellas se laqra mediante un rozante que mantiene la carredora en una parición extrema, el cambio de la parición se laqra por una señal de manda, que puede ser, manual, mecánica, eléctrica a par pilota hidráulica o neumática, que al producirse provocan el deslizamiento del embala a laada abierta, venciendo la torsión del rozante al comprimirlo.</p> <p>Esta válvula se emplea para controlar el accionamiento de cilindrar de simple efecto, cuya retornaze efectúa por la acción de un rozante a cargar exteriorar que no requiere retornar hidráulica.</p>						
FUNCION	<p>Permitir el para de aceite hidraulica a 1000 psi a las actuaderez (embalar) hidráulica</p> <p>Secundaria:</p>						
MODO DE FALLA POTENCIAL	Atarcomiento del embala.	Pérdida de señal eléctrica.		Fuqra Externa de Fluida	Pérdida de Entrada de Aceite Hidraulica a la Electroválvula		
MECANISMO DE FALLA (CAUSA)	Oxidación o barnizar en el aceite.	Barnizar en mal estado a conexiones flujar, cableada aterrizada a abierta, Canal Dañada, Furible Abierta.		Recarar a anillar mal instaladar.	Tapanamiento de Fluida Hidraulica		
TIPO DE FALLA	Oculto	Oculto		Virible	Oculto		
EFFECTOS DE FALLA LOCALES	Daña del Componente	Indisponibilidad de Alimentación eléctrica al Instrumenta		Fuqra de Aceite	No accionamiento de lar cilindrar hidraulica		
EFFECTOS DE FALLA	Efectar del Siguiente Nivel		Efectar Finaler		Metodar de Detección	Previción de Compensación	Redundancia
	En parada de maquina perida del sistema de racthea. En un arranque perdida de la frecuencia (Abarta la frecuencia)		Deflección del Ejo de Alta par perdida del sistema de Racthea cuando la unidad zala de servicio. Indisponibilidad para arranque de lar maquina.		Prubar Funcionaler en Paradar Planeadar y no Planeadar.	Accionamiento del Enqanche Mecánica (Clutch) energizando la electroválvula dando el Mark V. Señal L20CS18. Verificar en el compartimiento de accionar el accionamiento del Clutch.	MCR
EVALUACION CRITICIDAD CUANTITATIVA	Ocurrencia	Severidad	RPH	Detección	Valoracion de la Criticidad	Recomendacioner Adicionaler	
	6	7	42	0.9	38		
MANUTENIMIENTO PREVENTIVO	Descripción Mantenimiento Preventiva	Cad Manta Ptua	Recurreza HH	Na Técnicoar	Frecuenci a (Semana)	Actividader	
	Mantenimiento Preventiva a electroválvular.	MP-CC001	3	2	520	** e Desarmar y realizar mantenimiento en taller. Reemplazar lar barnizar terminaler, reemplazar lar terminaler del cableada de llegada. Realizar meqna del cableada. Instalar electroválvula, conectar eléctricamente, realizar probar funcionaler de enqanche del clutch. MP-INS-001	
MANUTENIMIENTO CORRECTIVO	Descripción Mantenimiento Correctiva	Cad Manta Ctua	Recurreza HH	Na Técnicoar	Materiales	Actividader	
	Cambio de Electroválvula	HC-CEV01	1	2	1005374	** Garantizar el airtamiento de aceite hidraulica a la electroválvula. Airtar y desconectar eléctricamente. Retirar la electroválvula. Realizar cambio. Conectar eléctricamente. realizar probar funcionaler de enqanche del clutch. MC-INS-001	
COMENTARIOS	** Garantizar el airtamiento de aceite hidraulica a la electroválvula. Retirar la electroválvula. Desarmar y realizar mantenimiento en taller. Reemplazar lar barnizar terminaler, reemplazar lar terminaler del cableada de llegada. Realizar meqna del cableada. Instalar electroválvula, conectar y realizar probar funcionaler.						
VALORACION	Este componente se considera en general de impacto medio. El daña del componente zala afecta al sistema y al equipo durante una parada el cual puede convertirse en impacto alto si el problema no se resuelve efectivamente. Como acción de previción adicional se desarrollar un Troublehoting para identificar la falla rapidamente.						
	Nombre		Firma		Fecha		
Realizada por	Eduin Mendaza						
Aprobada por	Eduin Mendaza						
Recibida por							

6. DESARROLLO DEL FMECA

En el formato definido para el FMECA se realiza el desarrollo. Para facilitar el ejercicio y poderlo plasmarlo en el proyecto del formato estándar se lleva a un formato descriptivo donde se evalúan todas las etapas del FMECA y las acciones de compensación, preventivas y correctivas para mitigar los impactos de los modos de falla.

La forma legible de lectura está considerada en el anexo C.

7. CONCLUSIONES

El FMECA es una herramienta invaluable que puede ser utilizada para las fases de tempranas de diseño o en las fases de operación (madurez). La utilidad en las fase temprana ayuda a identificar falencias en el diseño por lo tanto se pueden corregir para evitar que un daño mayor que desencadene desde un componente hasta un equipo mayor. Estas evaluaciones tempranas ayudan a optimizar los costos de construcción y mantenimiento.

El resultado de este tipo de análisis son para comparaciones de componentes únicos que tienen definidos unos modos de falla. La información derivada desde este análisis podrá suministrar una línea base para desarrollar otros análisis. Para fallas simultáneas, otro tipo de análisis puede ser desarrollado usando técnicas como análisis de árbol de fallas (FTA).

El desarrollo de la técnica de FMECA es considerado un documento vivo que amerita ser revisado periódicamente. Un equipo en operación tiene definido un ciclo de vida del activo, el cual en la etapa de operación la estrategia de mantenimiento necesita ser evaluada para garantizar la funcionalidad y evitar daños mayores.

El efecto del modo de detección puede ser combinado también, con los componentes que poseen redundancia como consideración del cálculo del valor numérico de la criticidad. Conceptualmente, el modo de detección en algunos componentes no es fácil de determinar en cambio la redundancia es fácil de determinar afectando directamente el valor establecido de la criticidad.

Los Turbocompresores son equipos de alta confiabilidad operacional. Pero la falla de cualquiera de sus componentes puede desencadenar en una falla mayor del equipo. Por tal motivo los sistemas instrumentados de seguridad del equipo reflejan las fallas mayores en los componentes mecánicos o anticiparse a estos modos de fallas.

Los resultados del FMECA serán presentados al grupo de Ingeniería de Confiabilidad para que sea revisado y aprobado para posterior cargue al sistema de gerenciamiento del mantenimiento.

El términos generales, una Solución de Administrar los Recursos de la Instrumentación es un sistema de ayuda a aumentar la cantidad de información como el estado y los diagnósticos disponibles en la instrumentación, de campo que busca alertar al personal de la planta de un problema o falla del equipo de emergencia; al mismo tiempo tener la información del estado del diagnóstico fácilmente.

BIBLIOGRAFIA

CROWELL, Willian. DENSON CROWELL, Failure Mode/Mechanism Distributions 1997, Report No. FMD-97.

DENSON, Willian. CHANDLER, Nonelectric Parts Reliability Data 1995, Report No. NPRD-95, Reliability Analysis Center, 201 Mill St., Rome, NY: 1995.

DEPARTMENT OF THE ARMY Reliability Analysis Center, 201 Mill St., Rome, NY: 1997.

DEPARTMENT OF THE ARMY, Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) for command, control, communication, computer, intelligence, surveillance and reconnaissance facilities, 29 September 2006.

DEPARTMENT OF THE ARMY, (Weapons System Technology Information Analysis Center), 201 Mill St., Rome, NY: 2005.

GENERAL ELECTRIC, Centrifugal Compressor Instructions Type BCL-506/A, Manual Volume I, April 2, 1997

GENERAL ELECTRIC, Gas Turbine MS-5002, Operating Maintenance, Turbine Control Panel Volume V, July 2, 1998.

GENERAL ELECTRIC, Gas Turbine Mechanical Maintenance Training Manual. John Brown. July 2, 1998.

GENERAL ELECTRIC, Series 3 Plus Anti Surge Controller Manual. C.C.C. For Centrifugal and Compressors. February 17, 1997.

GENERAL ELECTRIC, Series 3 Plus Performance Controller Manual. C.C.C. For Centrifugal and Compressors. February 18, 1997.

GENERAL ELECTRIC, Speedtronic Mark V, Gas Turbine MS-5002-C. Volume VI Nuovo Pignone. January 28, 1997.

L. J. GUBBINS, Study of Part Failure Modes, Report No. RAD-TR-64-377, Rome Air Development Center, Griffins AFB, NY 13441: 1964.

PREP (Power Reliability Enhancement Program) Data., Alion Science and Technology, WSTIAC 21 June 2002