

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



**DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DEL SISTEMA DE
BOMBEO G-2005A/B DE LA UNIDAD DE REFORMACIÓN CATALÍTICA
DE LA RPLC**

**PRESENTADO POR:
Br. JOSELYS DEL VALLE ROJAS BOLÍVAR**

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

INGENIERO MECÁNICO

BARCELONA, FEBRERO DE 2013

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



**DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DEL SISTEMA DE
BOMBEO G-2005A/B DE LA UNIDAD DE REFORMACIÓN CATALÍTICA
DE LA RPLC**

ASESORES



PROF. JOSÉ E. RENGEL

ASESOR ACADÉMICO

ING. GERARDO SOTILLO

ASESOR INDUSTRIAL

BARCELONA, FEBRERO DE 2013

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



DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DEL SISTEMA DE
BOMBEO G-2005A/B DE LA UNIDAD DE REFORMACIÓN CATALÍTICA
DE LA RPLC

JURADO

EL JURADO HACE CONSTAR QUE ASIGNÓ A ESTA TESIS LA CALIFICACIÓN DE:

APROBADO



PROF. JOSÉ E. RENGEL

ASESOR ACADÉMICO



PROF. JOHNNY MARTÍNEZ

JURADO PRINCIPAL



PROF. YORDY GONZÁLEZ

JURADO PRINCIPAL

BARCELONA, FEBRERO DE 2013

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo al Consejo Universitario para su aprobación”.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado a mis padres Amadelys Bolívar y José Rojas, quienes con su apoyo y amor fueron de gran ayuda para su realización.

A María José, José Gabriel y Helen; que este trabajo sirva de inspiración para cumplir sus metas.

A mi familia, quienes con su apoyo me llenaron de ganas para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermanos, y demás familiares.

A mis compañeros de estudio que a lo largo de mi carrera me acompañaron, ayudaron y con los cuales compartí momentos inolvidables, Karina, Carmen, Jorgito, Frank D., Randy, Mairim, Frank S., Yude, Javier, Mongua.

A mi amiga Rosvianny Felicia, quien colaboró enormemente con la elaboración de este trabajo.

A la Casa más Alta, la Universidad de Oriente, mi casa de estudio; especialmente al Departamento de Mecánica.

A mi tutor académico José E. Rengel por su colaboración.

Al profesor Luis Bravo, quien con su orientación ayudó a la realización de este trabajo.

Al ingeniero Blair Martínez, por estar siempre dispuesto a ayudarme.

Al personal de equipos rotativos del Taller Central de la Refinería Puerto La Cruz, Tomás, Francisco, Fernando, Edwin, Danny y Carlos; así como también a todos aquellos que dentro del taller me brindaron sus conocimientos para fortalecer los míos. Al señor Mario Hurtado.

A servicios técnicos, procesos, operaciones, mantenimiento en Hidroprocesos, y SIAHO de la refinería Puerto la Cruz, por su amabilidad.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el estudio del sistema de bombeo G-2005A/B de la Unidad de Reformación Catalítica en la Planta de Hidroprocesos de la Refinería Puerto la Cruz, con la finalidad de determinar las causas de las fallas que presenta este sistema. Primero, se recopiló la información técnica de las bombas en relación a sus características y funcionamiento dentro del contexto operacional. Luego, se calculó la tasa de fallas para determinar la cantidad de averías que se han presentado en un período de tiempo establecido. Seguidamente, se realizó un Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF), para identificar cuáles eran los modos de fallas y las consecuencias asociadas a éstos. Posteriormente, se analizaron las causas de las fallas mediante el Análisis de Árbol de Fallas (FTA), determinándose como principales causas: la cristalización de LPG, la corrosión, la erosión y la lubricación inadecuada de los sellos mecánicos. Con la ayuda del software Xfmea se organizó la información encontrada y a partir de esta se realizaron propuestas para disminuir las fallas en el sistema, tales como: realizar estudios químicos del LPG para la verificación de sus propiedades y de esta manera identificar la desviación, realizar las actividades de mantenimiento o reemplazo de los dispositivos encargados de la extracción del HCl del sistema y monitorear las condiciones operacionales de las bombas con el fin de detectar desviaciones y de esta manera realizar acciones que permitan mitigar los daños en los sellos mecánicos.

ÍNDICE

	Pág.
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE TABLAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción de la empresa.....	1
1.1.1 Reseña histórica.....	1
1.1.2 Descripción general de la empresa	3
1.1.3 Ubicación de la Refinería Puerto la Cruz.....	4
1.1.4 Unidad de Reformación Catalítica	4
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Alcance y limitaciones.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes	8

2.2 Fundamentos teóricos	9
2.2.1 Bombas centrífugas.....	9
2.2.1.1 Clasificación de las bombas centrífugas	9
2.2.1.2 Componentes de una bomba centrífuga	10
2.2.1.2.1. Eje	10
2.2.1.2.2. Impulsor.....	10
2.2.1.2.3. Carcasa	11
2.2.1.2.4. Caja de rodamientos	11
2.2.2 Equipo natural de trabajo.....	11
2.2.3 Contexto operacional.....	12
2.2.4 Análisis de modos y efectos de fallas	14
2.2.4.1 Función	14
2.2.4.2 Falla funcional	15
2.2.4.3 Modo de falla.....	15
2.2.4.4 Efectos de fallas	15
2.2.5 Tasa de fallas	15
2.2.5.1 Modelos de tasa de fallas	17
2.2.5.2 Cálculo de la tasa de fallas	19
2.2.6 Fundamentos de la distribución de Weibull	20
2.2.6.1 Expresión de Weibull para el cálculo de la tasa de fallas	20
2.2.7 Software Weibull++	21
2.2.8 Análisis de árbol de fallas (Fault Tree Analysis-FTA)	21

2.2.8.1	Objetivos de los FTA	22
2.2.8.2	Principios de construcción de los FTA	23
2.2.8.3	Estructura de los FTA	24
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO		27
3.1	Tipos de Investigación	27
3.1.1	Según la estrategia.....	27
3.1.2	Según el propósito.....	27
3.1.3	Según el nivel de conocimiento	28
3.2	Población y muestra	28
3.3	Técnicas de investigación y análisis	28
3.3.1.	Entrevistas informales	28
3.3.2.	Observación directa.....	29
3.3.3.	Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF)	29
3.3.4.	Software Xfmea	29
3.4	Etapas de la investigación	29
3.4.1	Descripción del contexto operacional del sistema de bombeo G-2005A/B (AMEF)	29
3.4.2	Determinación de los Modos y Efectos de Fallas de las bombas G-2005A/B.....	31
3.4.3	Cálculo de la tasa de fallas de las bombas G-2005A/B.....	32
3.4.3.1	Descripción del Software Weibull++.....	34
3.4.4	Análisis del árbol de fallas de las bombas G-2005A/B	36
3.4.5	Propuesta de mejoras al sistema de bombeo G-2005A/B.....	36

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL TRABAJO	39
4.1 Descripción del contexto operacional de las bombas G-2005A/B.....	39
4.1.1 Sub-sección de alimentación	40
4.1.2 Sub-sección del reactor	40
4.1.3 Sub-sección del separador	41
4.1.4 Sub-sección de re-contacto	41
4.1.5 Sub-sección del debutanizador	41
4.1.5.1 Información de las bombas G-2005A/B	43
4.2 Determinación de los modos y efectos de fallas de las bombas G- 2005A/B.....	44
4.3 Cálculo de la tasa de fallas del sistema de bombeo G-2005A/B.....	47
4.3.1 Cálculo de la tasa de fallas.....	48
4.3.2 Análisis de la tasa de fallas y de los parámetros de Weibull	54
4.4 Análisis el árbol de fallas del sistema de bombeo G-2005A/B.....	57
4.4.1 No bombea	59
4.4.1.1 Atascamiento del impulsor	59
4.4.1.1.1 Cristalización de LPG	60
4.4.1.1.2 Instalación inadecuada.....	61
4.4.1.1.3 Holgura inadecuada de anillos	61
4.4.1.2 Falla eléctrica	62
4.4.2 Presión de descarga menor a 237 psig.	62
4.4.2.1 Desgaste del impulsor.....	63
4.4.2.1.1 Roce con la carcasa	63

4.4.2.1.2 Corrosión.....	63
4.4.2.2 Desgaste del sello mecánico.....	64
4.4.2.2.1 Vibraciones.....	65
4.4.2.2.2 Erosión	66
4.4.2.2.3 Selección inadecuada de sello mecánico....	67
4.4.2.2.4 Falta de lubricación	68
4.4.2.3 Desgaste de la carcasa.....	68
4.4.2.4 Anillos de desgaste fuera de tolerancia	69
4.4.3 Caudal menor a 292 GPM.....	69
4.4.3.1 Fuga por partes del sellado.....	69
4.4.3.1.1 Falla Plan API 52.....	70
4.4.3.2 Impulsor dañado	71
4.4.3.3 Daños en rodamientos	72
4.4.3.3.1 Eje torcido	72
4.4.3.3.2 Mala lubricación.....	72
4.4.3.4 Recirculación en la succión	72
4.5 Propuesta de mejoras al sistema de bombeo LPG G-2005 A/B basado en la metodología FMECA con el uso del Software XFMEA	72
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1 Conclusiones.....	77
5.2 Recomendaciones.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
APÉNDICE A. Ley numérica de Weibull	82

APÉNDICE B. Software Weibull++	84
APÉNDICE C. Corte seccional de la bomba G-2005A/B	85
APÉNDICE D. Datos de operación de la bomba	86
APÉNDICE E. Cálculo de la tasa de fallas de la bomba G-2005B.....	87
APÉNDICE F. Plano del sello mecánico de la bomba G-2005A/B.....	93
APÉNDICE G. Norma ISO 10816-1 y espectros de vibración	94
APÉNDICE H. Escalas de severidad, ocurrencia y detección SAE J-1739	98

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Símbolos del árbol de fallas.....	26
Tabla 4.1. Datos técnicos de las bombas G-2005A/B.	44
Tabla 4.2. Análisis de los modos y efectos de fallas de las bombas G- 2005A/B.....	45
Tabla 4.2. Análisis de los modos y efectos de fallas de las bombas G- 2005A/B (continuación).	46
Tabla 4.3. Tiempos entre fallas y frecuencia acumulada de la bomba G- 2005A.....	48
Tabla 4.3. Tiempos entre fallas y frecuencia acumulada de la bomba G- 2005A. (Continuación).....	49
Tabla 4.4. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G- 2005A restando el parámetro γ	51
Tabla 4.5. Resultados del análisis con el uso del software Weibull++ para la bomba G-2005A.	55
Tabla 4.6. Resultados del análisis con el uso del software Weibull++ para la bomba G-2005B.	56
Tabla 4.7. Características del sello mecánico.	67
Tabla 4.8. Clasificación de riesgo para las causas de fallas.	73
Tabla A.1. Ley numérica de Weibull para obtener A y B.	82
Tabla D.1. Datos de operación de la bomba G-2005A.....	86
Tabla D.2. Datos de operación de la bomba G-2005B.....	86

Tabla E.1. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G-2005B.....	87
Tabla E.2. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G-2005B restando el parámetro γ	88
Tabla H.1. Escala de índice de severidad.	98
Tabla H.2. Escala de índice de ocurrencia.	100
Tabla H.3. Escala de índice de detección.	100
Tabla H.4. Clasificación de NPR.	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Dieta y productos de la Refinería Puerto La Cruz.....	3
Figura 2.1. Componentes básicos de las bombas centrífugas.....	10
Figura 2.2. Curva de la bañera ^[11]	16
Figura 2.3. Nuevos patrones de tasas de fallas ^[11]	17
Figura 2.4. Pasos en la construcción del FTA ^[13]	24
Figura 3.1. Proceso para describir el contexto operacional ^[8]	30
Figura 3.2. Intersección de los puntos t_1 , t_2 y t_3	33
Figura 3.4. Ventana de presentación del Software Weibull.....	34
Figura 3.5. Ventana de ingreso de los tiempos entre fallas al Software Weibull++.....	35
Figura 3.6. Ventana de números ID y tiempos entre fallas.....	35
Figura 3.7. Ventana de selección de la distribución de Weibull.....	35
Figura 3.8. Ventana de Presentación del software Xfmea.....	37
Figura 3.9. Ventana de importación desde Excel al software 1.....	38
Figura 3.10. Ventana de importación desde Excel al software 2.....	38
Figura 4.1. Vista general de la sección de reformación.....	39
Figura 4.2. Ubicación de las bombas G-2005A/B.....	42
Figura 4.3. Fechas de paro y arranque de la bomba A.....	47
Figura 4.4. Fechas de paro y arranque de la bomba B.....	48
Figura 4.5. Gráfica de Weibull para la bomba G-2005A.....	50
Figura 4.6. Gráfica de Weibull con rectificación para la bomba G-2005A.....	53
Figura 4.7. Tasa de fallas para la bomba G-2005A.....	55
Figura 4.8. Tasa de fallas para la bomba G-2005B.....	56
Figura 4.9. Árbol de fallas de las bombas G-2005A/B.....	58
Figura 4.10. Árbol de fallas (primera parte).....	59

Figura 4.11. Impulsor de la bomba G-2005B.	61
Figura 4.12. Árbol de fallas (segunda parte).	62
Figura 4.13. Comportamiento “Overall Value” en función del tiempo de la bomba G-2005A.....	65
Figura 4.14. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005A plano horizontal).	66
Figura 4.15. Árbol de fallas (tercera parte).....	69
Figura 4.16. Reservorio y tuberías del plan API 52 de la bomba G-2005A.	71
Figura 4.17. Organización de las causas de fallas en el software Xfmea.	74
Figura B.1. Botones “calculate” y “plot” en el software Weibull++.....	84
Figura C.1. Corte seccional y partes de la bomba G-2005A/B.....	85
Figura E.1. Gráfica de Weibull para la bomba G-2005B	89
Figura E.2. Gráfica de Weibull con rectificación para la bomba G-2005B.	92
Figura F.1. Plano del sello mecánico de la bomba G-2005A/B.....	93
Figura G.1. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005A plano vertical).....	96
Figura G.2. Comportamiento “Overall Value” en función del tiempo de la bomba G-2005B..	96
Figura G.3. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005B plano horizontal).....	97
Figura G.4. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005B plano vertical).....	97

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción de la empresa

1.1.1 Reseña histórica

Petróleos de Venezuela, S.A. fue creada por el Estado venezolano en el año 1975, en cumplimiento de la Ley Orgánica que Reserva al Estado, la Industria y el Comercio de Hidrocarburos (Ley de Nacionalización). Se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera del país. Sus operaciones son supervisadas y controladas por el Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo (MENPET)

En el año 1948, la empresa Vengref comenzó la construcción de la Refinería Puerto La Cruz, utilizando el puerto de Guanta para recibir los materiales y equipos necesarios para su instalación. Actualmente, es uno de los centros de procesamientos de crudo más importantes de PDVSA e integra un circuito de manufactura del petróleo extraído en los campos de los estados Monagas y Anzoátegui.

Para el año de 1950, se inició el funcionamiento de la planta con la unidad de destilación atmosférica número uno (DA-1) con la capacidad para procesar 44 mil barriles diarios (MBD). Para el año 1957, se instalaron las unidades de destilación atmosférica número 2 (DA-2) y de destilación y desintegración catalítica con capacidad para procesar 65 y 9 (MBD), respectivamente. En el año 1962, se puso en funcionamiento la Unidad de Alquilarción con capacidad para procesar 2,4 MBD modificando el patrón de refinación a un 40% de productos blancos y un 60% de combustible residual.



Entre los años 1960 y 1969, se aumentó la capacidad de procesamiento de las unidades DA-1(60 MBD), DA-2 (90 MBD) y desintegración catalítica (11 MDB), además para este mismo período se instaló la unidad de tratamiento de aminas de la planta de Alquilación.

En el año 1985, se inició la construcción de las plantas de control ambiental, la unidad despojadora de aguas agrias, el sistema de tratamiento de gases, la unidad de neutralización de afluentes ácidos y la unidad recuperadora de azufre.

Durante los años de 1988-1999 entró en servicio el sistema de tratamiento de gases (STG) para remover los gases combustibles y los compuestos sulfurosos para convertirlos en azufre líquido elemental; iniciaron las operaciones del sistema de tratamiento de efluentes de procesos (planta STEP) con la capacidad de procesar 7 mil metros cúbicos de aguas industriales; se creó la Gerencia de Seguridad de los Procesos (STP), para lograr identificación, entendimiento y control oportuno de los riesgos en los procesos y así evitar la ocurrencia de accidentes. Para este mismo período se incorporó el programa de seguridad basado en la detección y corrección de conductas riesgosas a través de la observación del desempeño del trabajador en la ejecución de tareas.

Para el año 2000, la capacidad instalada de procesamiento de crudo fue de 200 mil barriles por día, de los cuales se obtuvieron 73 mil barriles de gasolina y nafta, 12 mil barriles de kerosene-jet, 43 mil barriles de gasoil y 73 mil barriles de residual, insumos requeridos para la mezcla de combustibles comercializados en los mercados internos y de exportación.



En el 2001, se inició la construcción del proyecto de Valorización de Corrientes (Valcor) y en 2004 entró en operación las unidades de producción y reformado y diesel hidrotornado de bajo azufre del Proyecto Valcor.

En el año 2011, se puso en marcha el proyecto de conversión profunda, el cual contempla poner en marcha las unidades para procesar un total de 210 MBD distribuidos en 170 MBD de crudo Merey 16 °API y 40 MBD Santa Bárbara 40 °API. La inversión total estimada es de 5.163 millones de dólares y su culminación está prevista para el año 2013.

1.1.2 Descripción general de la empresa

La Refinería Puerto La Cruz cuenta con una capacidad nominal para procesar 200 MBD de crudo en sus tres (3) unidades de destilación, de los cuales 45% corresponde a crudo pesado. La dieta de la refinería es variada y esta se representa en la Fig. 1.1.

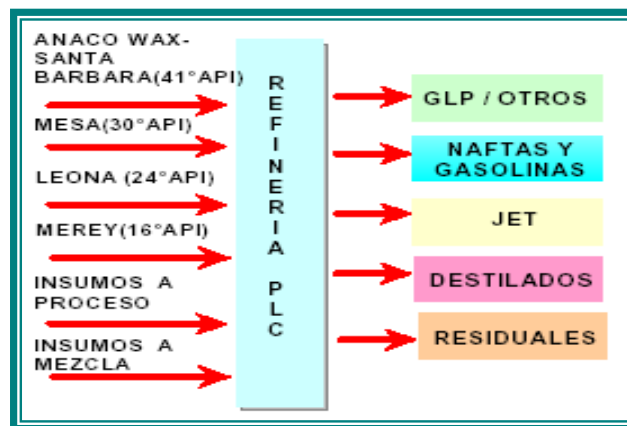


Figura 1.1. Dieta y productos de la Refinería Puerto La Cruz. [Fuente propia]

La Refinería Puerto La Cruz está formada por las siguientes plantas y unidades de procesos: Unidad de Destilación DA-1, Unidad de Destilación DA-2, Unidad de Destilación DA-3, Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC),



Alquilación, Sistema de Almacenaje de Crudo y Productos, Servicios Industriales e Hidroprocesos.

Como insumos a procesos se usa principalmente: Isobutano, Nafta Pesada, Gasóleo de Vacío y Residuo Desparafinado (SRQ) y los insumos a mezcla: Gas Natural, Gasolina Natural, Naftas, Alquilate, Gasolinas Sin Plomo y Destilados.

1.1.3 Ubicación de la Refinería Puerto la Cruz

La Refinería Puerto la Cruz está ubicada en la costa Nor-Oriental del país al Este de la ciudad de Puerto La Cruz en el estado Anzoátegui; tiene facilidades de acceso desde el Mar Caribe y está conectada por oleoductos con los campos de producción de Oriente. La ubicación de la refinería se muestra en la Fig. 1.2.



Figura 1.2. Ubicación de la Refinería Puerto La Cruz. [Fuente propia]

1.1.4 Unidad de Reformación Catalítica

El proceso de Reformación tiene como propósito original el de incrementar el octanaje de las naftas por medio de la promoción catalítica de un grupo de



reacciones químicas tendentes, primordialmente, a la reformación de la estructura molecular de los componentes hacia la producción de aromáticos desde naftenos y parafinas. Al producto principal se le conoce como reformado.

La Unidad de Reformación por Regeneración Catalítica Continua (Reformación CCR) está diseñada para una alimentación de 35.000 BPD y para producir un reformado que tenga un número de octanaje (RON) en el rango de 95-102. La sección de regeneración está diseñada sobre la base de diseño para 2.000 lbm de catalizador regenerador, la alimentación de la unidad se realiza con la nafta tratada que proviene de la Unidad NHT 1^[4].

1.2 Planteamiento del problema

Petróleos de Venezuela, S.A. fue creada por el Estado venezolano en el año 1975, en cumplimiento de la Ley de Nacionalización. El Complejo Refinador de Oriente es uno de los complejos de procesamientos de crudo más importantes de PDVSA, el cual está integrado por un circuito de manufactura del petróleo extraído en los campos de los estados Monagas y Anzoátegui. Geográficamente, este complejo abarca tres (3) áreas operacionales: Puerto La Cruz, El Chaure y San Roque, ubicadas en el Norte y Centro del estado Anzoátegui, con una capacidad total de procesamiento de crudos de 200 mil barriles por día.

La planta de Hidroprocesos consta de varias unidades de hidrotreatmento entre las cuales se encuentra la unidad de Reformación por Regeneración Catalítica (CCR). En esta unidad, específicamente en la sección del debutanizador, se remueven los componentes livianos del reformado, ahí se encuentran las bombas del tope del debutanizador G-2005 A/B. Éstas bombas devuelven parte del líquido LPG a la columna como



reflujo. Este sistema de bombeo presenta una serie de fallas repetitivas como fugas por los sellos mecánicos y atascamiento de las partes móviles, trayendo como consecuencia bajo flujo y baja presión en la descarga; esto ocasiona múltiples paradas del sistema, impidiendo el reflujo de LPG hasta el tope de la torre estabilizadora (debutanizador).

Debido a la problemática presentada, la gerencia de mantenimiento se encuentra en la necesidad de la aplicación de metodologías que permitan determinar las causas de las fallas que ocurren constantemente en el sistema de bombeo G-2005A/B de la unidad de reformación catalítica de la planta de Hidroprocesos. Para cumplir con esta meta, se utilizará el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) con el fin de identificar las fallas del proceso, y así minimizar el riesgo asociado a las mismas. Mediante la técnica de análisis de árbol de fallas se presentarán los resultados de las fallas identificadas mostrando las combinaciones de los eventos que conducen a la falla potencial. El uso del software XFMEA ayudará a la propuesta de mejoras al sistema de bombeo basado en la metodología FMECA y de esta manera PDVSA pueda minimizar la ocurrencia de fallas en el sistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar las causas de las fallas del sistema de bombeo G-2005 A/B de la unidad de Reformación Catalítica de la planta de Hidroprocesos de la Refinería Puerto La Cruz.



1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir el contexto operacional del sistema de bombeo G-2005A/B de la Unidad de Reformación Catalítica de la planta de Hidroprocesos de la RPLC.
2. Determinar los modos y efectos de fallas (AMEF) del sistema de bombeo G-2005A/B mediante el uso del Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF).
3. Calcular las tasas de fallas del sistema de bombeo G-2005 A/B.
4. Analizar el árbol de fallas del sistema de bombeo G-2005A/B.
5. Proponer mejoras al sistema de bombeo LPG G-2005 A/B basado en la metodología FMECA con el uso del Software XFMEA.

1.4 Alcance y limitaciones

Este trabajo se enfocó a la determinación de las causas de fallas de las bombas G-2005A/B de la unidad de reformación catalítica en la planta de Hidroprocesos de la Refinería Puerto la Cruz y, en base a estas causas encontradas se realizaron propuestas para disminuir las fallas en el sistema.

Las limitaciones para la elaboración de este trabajo fueron:

- Limitada información de las bombas.
- Poca disponibilidad del personal de la refinería al momento de requerirse información de las bombas.
- Falta de información en los registros de las fallas, por lo cual se confió en la experiencia del personal de mantenimiento y operaciones de la planta.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

A continuación se presenta un resumen de los trabajos que sirvieron como base para el desarrollo del presente proyecto:

En el año 2005, **Boullon, J.**^[1], realizó una evaluación técnica de las fallas recurrentes en las bombas de una unidad de recuperación de diluyente de un mejorador de crudo extra pesado. Con la utilización de la metodología análisis causa raíz se determinaron las causas principales de las averías de los equipos; además, se determinó por medio de métodos estadísticos cual de los elementos era el que más fallaba, resultando ser el sello mecánico. Por último, se presentó un plan de mantenimiento con la finalidad de disminuir las fallas en los equipos. Este trabajo presentó los procedimientos necesarios para hallar los indicadores de mantenimiento; mostrándose metodologías para el cálculo de la tasa de fallas.

En el año 2007, **Pereira, R.**^[2], identificó las causas que producían fallas en las bombas de glicol pobre, pertenecientes al sistema de bombeo de regeneración de la planta PIGAP II. Este trabajo consistió en el estudio de los sistemas de bombeo de la planta de inyección de gas a alta presión (PIGAP II), utilizando como herramienta principal la metodología del análisis causa raíz para la determinación de las causas de las fallas y su efecto. Se logró detectar que existían restricciones para bombear el tritilenglicol debido a la cantidad de accesorios que poseían las líneas, las fallas producidas por el deterioro, desajustes de partes móviles y agentes contaminantes en el fluido. En este trabajo se presentaron las metodologías utilizadas para hallar las causas de fallas en equipos rotativos.



En el año 2011, **Vivas, C.**^[3], efectuó un estudio de los sellos mecánicos del sistema de bombeo de crudo extra pesado de la torre despojadora de la Planta de Mezclados Jose de Petrolera Sinovensa S.A. con la finalidad de determinar las causas de las reiteradas fallas en el sistema mediante el uso de la metodología de causa-efecto. Para establecer las causas de las fallas de los sellos mecánicos se realizó una evaluación de las condiciones operacionales del sistema de bombeo, asistido con PIPEPHASE, con el objeto de hallar el punto de operación de las bombas y compararlas con el punto de diseño. Las causas de las reiteradas fallas eran: mala selección del fluido barrera, mala operación de las bombas, alto nivel de vibración y agentes corrosivos y contaminantes en el fluido de trabajo. Este trabajo presentó propuestas usadas para la disminución de las fallas en sistemas de bombeo, mediante el estudio de las causas de fallas y su efecto en el sistema.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son máquinas que agregan energía al fluido cuando lo aceleran en rotación del impulsor. El fluido se lleva al centro del impulsor y es lanzado hacia fuera por las aspas. Al salir del impulsor, el fluido pasa por una voluta en forma de espiral, donde parte de la energía cinética se convierte en presión de fluido^[4].

2.2.1.1 Clasificación de las bombas centrífugas

Los principales tipos de bombas centrífugas son^[5]:

- Radiales, axiales y diagonales.
- De impulsor abierto, semiabierto y cerrado.

- Horizontales y verticales.

2.2.1.2 Componentes de una bomba centrífuga

Los componentes básicos de las bombas centrífugas se muestran en la Fig. 2.1.

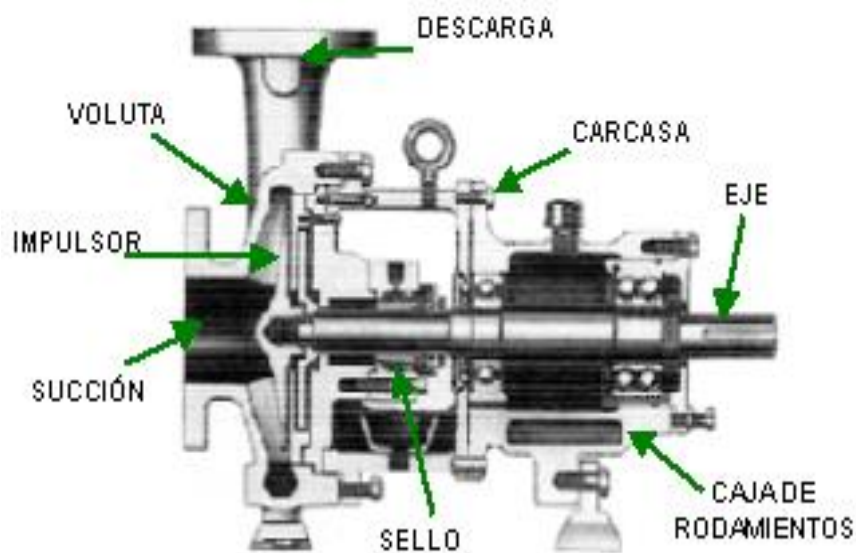


Figura 2.1. Componentes básicos de las bombas centrífugas. [Fuente propia]

2.2.1.2.1. Eje

Es el elemento principal de la parte rotativa de la bomba, donde va montado el impulsor. Su función básica es transmitir los movimientos que se presentan en el arranque y operación de la bomba^[6].

2.2.1.2.2. Impulsor

Es un mecanismo de ruedas con álabes que giran a gran velocidad, desarrollando energía cinética y transmitiéndola al líquido que se bombea. A



medida que el líquido recorre la voluta de la bomba y la boca de descarga, esta energía se transforma en energía de presión^[6].

2.2.1.2.3. Carcasa

Constituye el cuerpo de la bomba donde van alojados los impulsores. El impulsor de una bomba centrífuga carga líquido a una velocidad alta. Una función de la cubierta de la bomba es reducir esta velocidad y convertir la energía cinética en energía de presión. Ya sea por medio de la voluta o de un conjunto de paletas o álabes difusores^[6].

2.2.1.2.4. Caja de rodamientos

Es la parte encargada de soportar al rotor y mantenerlo centrado dentro de la carcasa tanto en posición radial como axial a través de los rodamientos. Los rodamientos son componentes que facilitan el movimiento giratorio del rotor, manteniéndolo alineados con las partes estacionarias de la bomba^[6].

2.2.1.2.5. Sellos mecánicos

Los sellos mecánicos pueden definirse técnicamente como dispositivos que previenen el escape del fluido de un recipiente atravesado por un eje rotatorio, realizándose el sellado por el contacto axial de sus caras, las cuales se encuentran perpendiculares al eje y en movimiento relativo una con respecto de la otra^[6].

2.2.2 Equipo natural de trabajo

Es un equipo multidisciplinario que pertenecen a una organización y trabajan en conjunto, durante un período de tiempo, para solucionar problemas específicos, con ayuda del valor agregado que suministra cada miembro para mejorar la gestión a corto plazo.



Los integrantes del equipo y su función se explican a continuación^[7]:

- **Supervisor de producción.** Aportan conocimiento sobre el efecto y consecuencias de las fallas.
- **Supervisor de mantenimiento.** Aportan el conocimiento de las causas de las fallas y maneras de evitarlas.
- **Especialista en procesos.** Participan para resolver las controversias en las reuniones de trabajo.
- **SIAHO.** Informan sobre el impacto en seguridad, ambiente e higiene ocupacional.
- **Planificador.** Se encarga de incorporar las actividades que minimizan la ocurrencia de las fallas en el programa de mantenimiento, con su frecuencia correspondiente.
- **Analista de mantenimiento.** Aportan información relacionada con el comportamiento del equipo en el tiempo.
- **Facilitador general.** Es un miembro extra del grupo, su labor consiste en fijar reuniones, coordinarlas y verificar que el trabajo del equipo se adapte a la metodología MCC.

2.2.3 Contexto operacional

El contexto operacional representa las circunstancias en las cuales se espera que opere un activo físico o sistema. En éste documento debe describirse el entorno en el que opera el equipo, propósito del sistema o equipos, descripción de los equipos y procesos, los dispositivos de seguridad que se encuentran en el sistema, planes de mantenimiento, operaciones, límites del



sistema y el listado de los componentes constitutivos del sistema que se analiza. Éste es el primer documento que debe realizar el analista, los aspectos a considerar son los siguientes^[8]:

Resumen operativo

- Jerarquización del sistema.
 - Propósito del sistema.
 - Descripción de los equipos.
 - Descripción del proceso.
 - Dispositivos de seguridad.

- Diagrama Entrada-Proceso-Salida (EPS).
 - Metas de seguridad/Ambientales/Operacionales.
 - Planes futuros.

Personal

- Turnos rotativos.
- Operaciones.
- Mantenimiento.
- Parámetros de calidad.
- Gerencia.

División de procesos

- División del proceso en sistemas.
- Definición de los límites de los sistemas.
- Listado de componentes para cada sistema, incluyendo dispositivos de seguridad e indicadores.



2.2.4 Análisis de modos y efectos de fallas

El Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF), constituye la herramienta principal del MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), para la optimización de la gestión de mantenimiento en una organización determinada. El AMEF es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que estos ocurran y puedan afectar o impactar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado.

Por lo expresado anteriormente, se deduce que el objetivo básico del AMEF, es encontrar todas las formas o modos en los cuales puede fallar un activo del proceso, e identificar las posibles consecuencias o efectos de las fallas en función de tres criterios básicos para el MCC: seguridad humana, ambiente y operaciones (producción). Para poder cumplir con este objetivo, los grupos de trabajo deben realizar el AMEF cumpliendo la siguiente secuencia^[9]:

- Explicar las funciones de los activos del área seleccionada y sus respectivos estándares de ejecución.
- Definir las fallas funcionales asociadas a cada función del activo.
- Definir los modos de fallas asociados a cada falla funcional.
- Establecer los efectos o las consecuencias asociadas a cada modo de falla.

2.2.4.1 Función

El MCC define el término función, como el propósito o la misión de un activo en un contexto operacional específico (cada activo puede tener más de una función en el contexto operacional).



Para decidir cuando un activo no está trabajando satisfactoriamente, es necesario definir lo que el activo debe hacer para trabajar apropiadamente, por lo cual, uno de los aspectos importantes dentro del AMEF para el grupo de trabajo MCC, consiste en definir adecuadamente la función o las funciones asociadas a cada activo en su contexto operacional^[9].

2.2.4.2 Falla funcional

El MCC define falla funcional como una ocurrencia no predecible, que no permite al activo alcanzar el estándar de ejecución esperado y trae como consecuencia que el activo no pueda cumplir su función o la cumpla de forma eficiente (cada estándar de ejecución puede tener más de una falla funcional)^[9].

2.2.4.3 Modo de falla

El MCC define el modo de falla como la causa de cada falla funcional. En otras palabras el modo de falla es el que provoca la pérdida de función total o parcial de un activo en su contexto operacional (cada falla funcional puede tener más de un modo de falla)^[9].

2.2.4.4 Efectos de fallas

Permite definir lo que sucede al producirse cada modo de falla, con lo cual es posible determinar el nivel de mantenimiento que se debe aplicar. Es la evidencia o los hechos que pueden observarse si se presenta un modo de falla en particular^[7].

2.2.5 Tasa de fallas

La tasa de fallas expresa la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo que ocurren en el período en que se estudia un elemento^[10].

Tradicionalmente se ha considerado que la tasa de fallas tenía forma de bañera (ver Fig. 2.2). Cuando se inicia la vida del equipo, la tasa de fallas resulta ser relativamente alta (mortalidad infantil); una vez que todos los componentes se han acoplado, la tasa de fallas es relativamente constante y baja (período de fallas aleatorias); posteriormente tras un tiempo de funcionamiento la tasa de fallos comienza a aumentar (envejecimiento o desgaste) hasta que llega un momento en el que todos los elementos habrán fallado^[11].

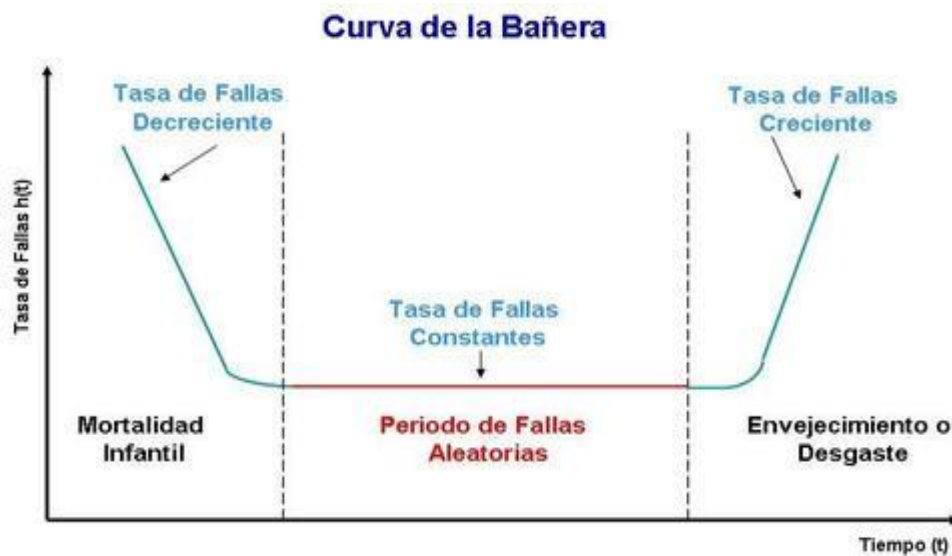


Figura 2.2. Curva de la bañera^[11].

Las investigaciones actuales indican que no sólo ocurre un modelo de falla sino que existen muchos tipos de equipos o componentes que no presentan una tasa de fallas con forma de curva de la bañera, presentándose seis modelos diferentes.

La Fig. 2.3 muestra las curvas de deterioro con el porcentaje de componentes que se ajustan al modelo presentado, estas curvas se derivan de un estudio realizado sobre aviones civiles y muestra que sólo el 4% de los

elementos estudiados siguen una tasa de fallas con forma de curva de la bañera. Se muestra la probabilidad de falla contra el tiempo de funcionamiento para una gran variedad de elementos eléctricos y mecánicos. No todas las fallas son iguales, las consecuencias de las fallas y sus efectos en el resto del sistema, dependen de la planta y el entorno operativo en el cual ocurre.

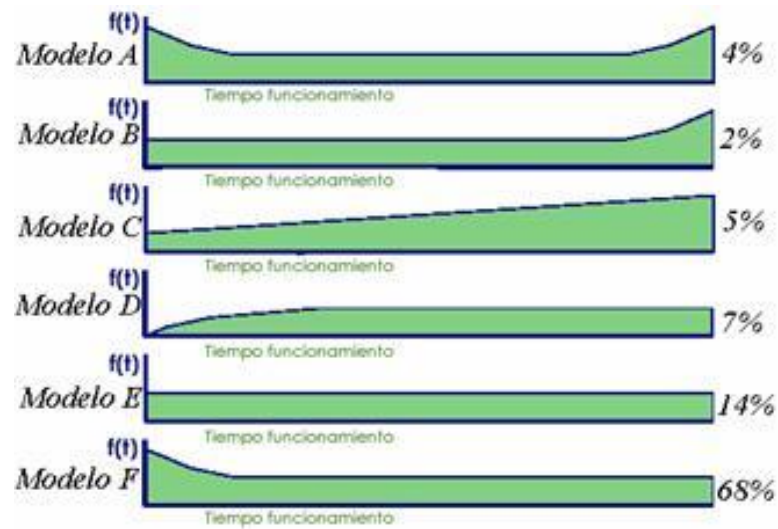


Figura 2.3. Nuevos patrones de tasas de fallas^[11].

Las investigaciones sobre los modos de falla revelan que la mayoría de las fallas de los sistemas complejos formados por componentes mecánicos, eléctricos e hidráulicos fallarán en alguna forma fortuita y no son predecibles con algún grado de confianza^[11].

2.2.5.1 Modelos de tasa de fallas

A continuación se describen los modelos de tasa de fallas presentados en la Fig. 2.3:



- **Modelo A.** Este patrón de falla, llamado “curva de la bañera”, es realmente una combinación de dos patrones de falla diferentes, uno de los cuales contiene mortalidad infantil y el otro muestra una probabilidad de falla que aumenta con el tiempo. Incluso se puede considerar un tercer período (la parte central de la bañera) donde se produce fallas de manera aleatoria^[11].
- **Modelo B.** Este patrón de falla muestra una probabilidad de falla constante o en ligero aumento y una zona final de agotamiento donde la probabilidad de falla aumenta rápidamente^[11].
- **Modelo C.** Este patrón muestra una probabilidad de falla creciente durante todos los períodos, pero sin alcanzar un punto en el que se pueda considerar al elemento como “desgastado” ^[11].
- **Modelo D.** Este patrón representa una probabilidad condicionada de falla asociada a una distribución de Weibull de parámetro de forma $1 \leq \beta \leq 2$ ^[11].
- **Modelo E.** Este patrón de falla muestra una probabilidad de falla constante durante toda la vida del componente. Representa componentes que fallan de una manera aleatoria independientemente del tiempo que lleven funcionando^[11].
- **Modelo F.** Este patrón es el más común de todos y el único en el cual la probabilidad de fallas decrece con la edad (aparte del modelo A que es un caso especial como ya se ha comentado) ^[11].

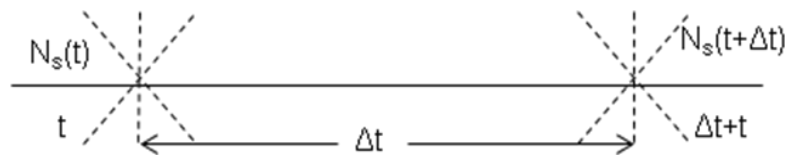
2.2.5.2 Cálculo de la tasa de fallas

La tasa de fallas representa la proporción de fallas por unidad de tiempo. Su forma general es:

$$\lambda = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Duración de uso}} \quad (2.1)$$

Existen dos casos para el cálculo de la tasa de fallas y se describen a continuación:

- **Caso 1.** Los elementos que fallan son reemplazados en el instante Δt ^[12].



$$\lambda = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_o \times \Delta t} = \frac{N_f}{N_o \times \Delta t} \quad (2.2)$$

Donde:

N_o =Número inicial de dispositivos.

$N_s(t)$ =Número de dispositivos sobrevivientes al instante t

$N_s(t + \Delta t)$ =Número de dispositivos sobrevivientes al instante $t + \Delta t$.

N_f =Número de fallidos durante Δt .

- **Caso 2.** Los elementos que fallan no son reparados. En este caso $N_s(t)$ es diferente de N_o , la función $N_s(t)$ es decreciente.

$$\lambda = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \times \Delta t} \quad (2.3)$$



Donde:

$N_s(t)$ =Número de dispositivos sobrevivientes al instante t

$N_s(t+\Delta t)$ =Número de dispositivos sobrevivientes al instante t+ Δt .

2.2.6 Fundamentos de la distribución de Weibull

Una de las ventajas significativas que ofrece la distribución de Weibull consiste en que es muy manejable y se acomoda a las tres zonas (mortalidad infantil, período de fallas aleatorias, envejecimiento o desgaste) de la curva de la bañera. La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya elección y ajuste adecuado permite obtener mejores ajustes, que con otras distribuciones.^[10]

2.2.6.1 Expresión de Weibull para el cálculo de la tasa de fallas

Esta función proporciona una tasa de falla instantánea en un momento (t), su modelo matemático se expresa de la siguiente manera^[10]:

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

- **Parámetro de posición (γ).** El más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.
- **Parámetro de escala o característica de vida útil (η).** Su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Cuanto más alto, las máquinas pueden ser de mayor duración.
- **Parámetro de forma (β).** Refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.



El parámetro Beta permite a la distribución de Weibull tomar diversas formas; cuando β es inferior a 1 se le denomina a esta fase como de mortalidad infantil; cuando toma valores cercanos a uno se describe la fase con el nombre de vida útil, y en el evento del β tomar valores mayores de 1, se conoce la fase como de envejecimiento o de desgaste^[10].

2.2.7 Software Weibull++

El software Weibull++ de Reliasoft es el estándar para análisis de datos de vida utilizado por miles de empresas en todo el mundo. El software realiza el análisis de datos de vida utilizando más de 13 distribuciones estadísticas. Este software posee diversas herramientas de análisis que permiten varios tipos de cálculos e informes gráficos que incluye la escala Weibull.

El Software utiliza varias distribuciones, tales como: Weibull (con hasta tres parámetros), la Weibull Mixta, exponencial (con hasta dos parámetros), lognormal, normal, Gama generalizada, Gama, Logistic, Loglogistic, Gumbel y Weibull-Bayesiana.

Para el análisis utiliza la distribución de Weibull con hasta tres parámetros con el fin de calcular el parámetro de forma (β), escala (η) y posición (γ), los cuales son necesarios para el cálculo de la tasa de falla de los equipos estudiados.

2.2.8 Análisis de árbol de fallas (Fault Tree Analysis-FTA)

Los árboles de fallas son gráficas organizadas que representan las condiciones o factores causantes o contribuyentes a la ocurrencia de un resultado definido como evento máximo o tope. La representación de un



árbol de fallas debe ser clara y fácil de entender, analizar y si es necesario de reconfigurar para facilitar la identificación de:

- Factores que afecten la investigación del evento máximo y como se ha generado este.
- Factores que afecten las características de confiabilidad y desempeño del sistema.
- Eventos que afectan la funcionalidad de más de un componente, o pueden afectar a más de dos componentes de forma similar, o bien afectan la independencia.

Los análisis de arboles de fallas son métodos deductivos (razonamiento hacia atrás o de arriba hacia abajo) que permiten realizar combinaciones de eventos de tal forma que se puede simular la forma en que el evento máximo se ha desarrollado, los análisis de los arboles de fallas pueden ser cualitativos o cuantitativos.

Un análisis cualitativo puede ser usado para investigar las causas potenciales que generaron el evento máximo. El principal objetivo de los análisis de los arboles cualitativos es la identificación del juego de corte mínimo para determinar el camino del evento básico que afecta al evento máximo^[13].

2.2.8.1 Objetivos de los FTA

Los arboles de fallas pueden ser utilizados de forma independiente o en conjunto con otras técnicas de confiabilidad, con los objetivos de^[13]:

- Identificar la causa o combinación de casos que llevan al evento máximo.



- Determinar que modos o factores tienen una máxima contribución en la probabilidad de fallar o indisponibilidad en el caso que los sistemas sean reparables, para identificar posibles mejoras a la confiabilidad de los sistemas.
- Analizar y comparar varias alternativas de diseño para mejorar la confiabilidad de un diseño.
- Identificar los potenciales modos de fallas que ocasionan la inseguridad de un sistema y la evaluación de su correspondiente probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de mitigación de fallos.
- Identificar los eventos comunes.
- Buscar el evento o la combinación de eventos que son los más probables causantes del evento máximo.
- Calcular la probabilidad o la frecuencia del evento máximo.

2.2.8.2 Principios de construcción de los FTA

Para que el desarrollo de los FTA sea efectivo se deberá seguir un procedimiento que podrá consistir de los siguientes pasos^[13]:

1. Identificar los objetivos del FTA.
2. Definir el evento máximo/tope.
3. Definir el alcance del FTA.
4. Definir la resolución del FTA.
5. Definir las reglas generales del FTA.
6. Construir el FTA.

7. Evaluar el FTA.
8. Interpretar y presentar los resultados.

En la Fig. 2.4 se presenta de manera esquemática los pasos a seguir para la elaboración de los arboles de fallas.

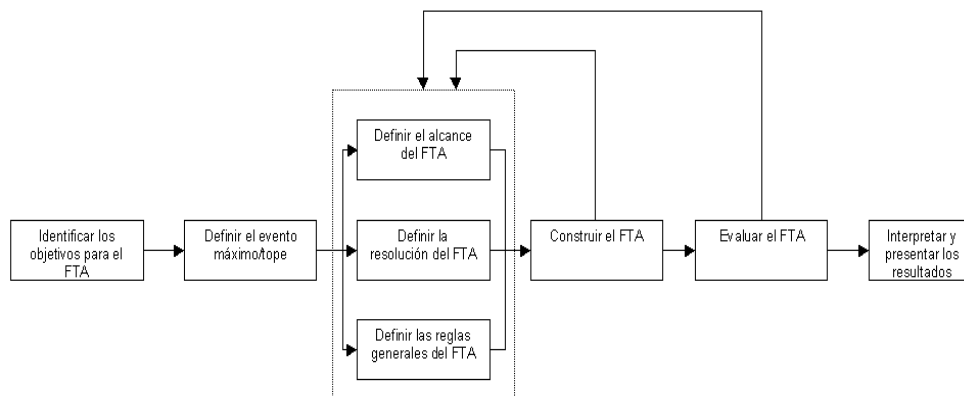


Figura 2.4. Pasos en la construcción del FTA^[13].

2.2.8.3 Estructura de los FTA

Los componentes de los FTA son:

Compuertas

Son símbolos que muestran relaciones existentes entre los eventos iniciales y eventos de salida, hay dos tipos de compuertas^[14]:

- Puerta “Y”: representa una condición en la cual todos los eventos mostrados debajo de la puerta (puerta de entrada) tienen que estar presentes para que ocurra el evento arriba de la puerta (evento resultado). Esto significa que el evento resultado ocurrirá solamente si todos los eventos de entrada existen simultáneamente.



- Puerta “O”: representa una situación en la cual cualquier de los eventos mostrados debajo de la puerta (entrada) llevarán al evento mostrado arriba de la puerta (resultado). El evento ocurrirá si solamente uno o cualquier combinación de los eventos de entrada ocurre^[14].

Símbolos

Hay cinco tipos de símbolos para eventos, estos son^[14]:

1. Rectángulo. Es el principal componente básico del árbol. Representa el evento negativo y se localiza en el punto superior del árbol y puede localizarse por todo el árbol para indicar otros eventos que pueden dividirse en más. Este es el único símbolo que tendrá abajo una puerta de lógica y eventos de entrada.
2. Círculo. Representa un evento base en el árbol. Estos se encuentran en los niveles inferiores del árbol y no requieren más desarrollo o divisiones. No hay puertas o eventos debajo del evento base.
3. Diamante. Identifica un evento terminal sin desarrollar. Tal evento es uno no completamente desarrollado debido a una falta de información o significancia.
4. Óvalo. Representa una situación especial que puede ocurrir solamente si ocurren ciertas circunstancias. Esto se explica dentro del símbolo del óvalo.
5. Triángulo. Significa una transferencia de una rama del árbol de fallas a otro lugar del árbol. Donde se conecta un triángulo al árbol con una flecha, todo lo que esté mostrado debajo del punto de conexión pasa a otra área del árbol.

En la Tabla 2.1 se muestran los símbolos y puertas lógicas más usados en los árboles de falla.








SÍMBOLOS	SIGNIFICADO DEL SÍMBOLO
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol.
	<p>PUERTA "Y"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1).</p>
	<p>PUERTA "O"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1).</p>

Tabla 2.1. Símbolos del árbol de fallas^[13].

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipos de Investigación

3.1.1 Según la estrategia

Se realizó una investigación mixta ya que se empleó la investigación **documental** para la búsqueda de información en diferentes tipos de documentos como libros, revistas, guías práctico-teóricas, registros, entre otros. Este tipo de investigación se define como: “el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos” [15].

Además, se empleó la investigación de **campo** para obtener información directamente de la Unidad de Reformación Catalítica Continua donde se encuentran las bombas. Definiéndose este tipo de investigación como: “el análisis sistemático de problemas de la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas de investigación conocidos” [15].

3.1.2 Según el propósito

Ya que se usó la investigación básica para la recolección de información y se ajustó al contexto donde operan las bombas en la planta de Hidroprocesos, se define la investigación según el propósito como **aplicada**. Como lo define Namakforoosh (2005) “sirve para tomar acciones y establecer políticas y



estrategias. La característica básica de la investigación aplicada es el énfasis en resolver problemas.”

3.1.3 Según el nivel de conocimiento

El desarrollo y descripción del fenómeno en estudio se logró mediante el análisis, descripción e interpretación de la naturaleza actual del equipo, sustentándose en una investigación de carácter **descriptivo**, tal como lo define Namakforoosh (2005) “la investigación descriptiva es una forma de estudio para saber quién, dónde y por qué del sujeto de estudio. En otras palabras, la información obtenida en un estudio descriptivo explica perfectamente a una organización”.

3.2 Población y muestra

La población estuvo representada por las bombas G-2005A/B, esto representa la totalidad de los elementos estudiados. La muestra tomada para el estudio fue igual a la población ya que los elementos seleccionados para el estudio incluyen, a la bomba con la denominación A puesta en marcha y a la otra bomba con la denominación B en espera.

3.3 Técnicas de investigación y análisis

Para la realización de este trabajo se usaron técnicas para la recolección y análisis de datos relacionados con las bombas G-2005A/B. Las técnicas que se usaron se describen a continuación:

3.3.1. Entrevistas informales

Se utilizó para recabar información de manera verbal sobre el estado en el que se encuentran operando las bombas a través de la comunicación oral con el personal de operaciones y de mantenimiento.



3.3.2. Observación directa

Mediante la aplicación de esta técnica se pudo realizar el proceso investigativo desde el mismo lugar donde se encuentran las bombas. También permitió familiarizarse con los equipos en el área de trabajo.

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

Mediante la aplicación de este análisis y con la ayuda del personal de mantenimiento, se obtuvieron las posibles causas de las fallas que presentan las bombas G-2005A/B. El AMEF sirvió como base para la elaboración del árbol de fallas.

3.3.4. Software Xfmea

Con la ayuda de este software se organizó la información correspondiente a las fallas siguiendo el formato sugerido en la norma SAE J-1739, así como también se determinaron las causas de fallas más críticas por números prioritarios de riesgo, basándose en las escalas de severidad, ocurrencia y detección presentados en dicha norma.

3.4 Etapas de la investigación

La realización de este trabajo de investigación se llevó a cabo en una serie de etapas, que se describen a continuación:

3.4.1 Descripción del contexto operacional del sistema de bombeo G-2005A/B (AMEF)

Para la descripción del contexto operacional de las bombas G-2005A/B se organizó la información referente a los equipos tomando datos de manuales,

diagramas de proceso, notas técnicas y diagramas P&ID; después de esto, se procedió a describir el contexto como se presenta en la Figura 3.1.

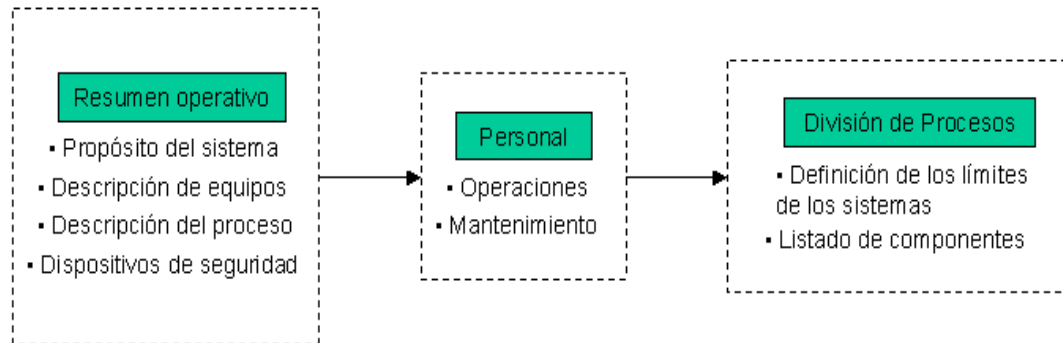


Figura 3.1. Proceso para describir el contexto operacional^[8].

Se organizaron visitas a la planta y entrevistas con el personal encargado del mantenimiento de las bombas. Con esto se logró la familiarización con el sistema que se estudió, permitiendo verificar su estado y el comportamiento durante su operación.

La descripción de los equipos y la descripción del proceso se llevaron a cabo con los conocimientos previos adquiridos, la experiencia del personal de mantenimiento y la bibliografía relacionada.

Los datos técnicos de las bombas se obtuvieron de la data sheet del equipo, esta información fue proporcionada por el personal de servicio técnico de la Refinería Puerto La Cruz. De la misma manera, se recopiló la información relacionada con el mantenimiento de las bombas, utilizando la check list para determinar cuáles eran las acciones y la frecuencia de mantenimiento aplicada al equipo, basándose en la norma PDVSA MM-01-01-03.



3.4.2 Determinación de los Modos y Efectos de Fallas de las bombas G-2005A/B

Con la ayuda del equipo natural de trabajo se elaboró el AMEF para determinar las fallas, los modos y los efectos asociados a cada falla funcional de las bombas, de tal manera que se recopiló información y se determinaron las funciones y los parámetros de operación de las bombas dentro del contexto operacional. Esto se logró entrevistando al personal de operaciones y de mantenimiento de la planta de Hidroprocesos en la Refinería Puerto La Cruz.

Una vez determinadas las funciones de las bombas se procedió a establecer cuáles eran las fallas funcionales asociadas a cada estándar de operación; esto se llevó a cabo con la revisión de los informes técnicos de las bombas, en los cuales se establece cual fue la falla que se presentó y la información relacionada a éstas.

Para definir los modos de fallas relacionados a cada falla funcional, se observó que es lo que provoca que las bombas pierdan la capacidad total o parcial de cumplir con la función para la cual están diseñadas. Tomando en cuenta que cada falla funcional puede tener más de un modo de falla, se determinaron diferentes modos con la finalidad de verificar cual o cuales son los que afectan al equipo.

Una vez identificadas las funciones, fallas funcionales y los modos de fallas se procedió a definir el efecto que se presenta después de la ocurrencia de un modo de falla, explicando los hechos que se pueden observar una vez que se presenta un modo de falla en particular.



3.4.3 Cálculo de la tasa de fallas de las bombas G-2005A/B

En esta etapa de la investigación se procedió a calcular la tasa de fallas de las bombas G-2005A/B, para esto se tomaron datos de los historiales proporcionados por el personal de confiabilidad de la RPLC. Una vez obtenidas las fechas de paro de las bombas, se calcularon los tiempos de operación (TO), tiempo fuera de servicio (TFS) y el tiempo entre fallas (TEF).

Se calculó la tasa de fallas de las bombas G-2005A/B usando el algoritmo de Weibull; determinando los parámetros relacionados en la Ec. (2.4). El procedimiento que se siguió para el cálculo de la tasa de fallas mediante la distribución de Weibull se presenta a continuación:

1. Se ordenan los tiempos entre fallas (TEF) en forma creciente y se asigna a cada uno un número ordinal “i” de acuerdo a su posición.
2. Se calculó la función de acumulación de fallas F(i) utilizando la Ec. (3.1) para cada valor de “i” y donde “n” representa el número de observaciones.

$$F(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (3.1)$$

3. Se graficaron las coordenadas de los puntos (TEF,F(i)) en el papel de Weibull. Se observó que la tendencia presentada por los puntos graficados en el papel de Weibull es la de una curva, por lo cual se procedió a la rectificación de la misma aplicando la ecuación:

$$\gamma = \frac{t_2^2 - t_1 \times t_3}{2 \times t_2 - t_1 - t_3} \quad (3.2)$$

4. Para el cálculo de t1, t2 y t3 se tomaron 2 puntos de la curva, separados pero no extremos los cuales representan los tiempos t1 y t3 y se procedió a calcular la distancia entre ellos empleando la Ec. (3.3). Se logró obtener

el valor de Y_2 , el cual es el valor correspondiente en el eje de las ordenadas para t_2 .

$$Y_2 = \frac{Y_1 + Y_3}{2} \quad (3.3)$$

En la Fig. 3.2 se muestra la representación gráfica de la obtención de los puntos t_1 , t_2 y t_3 .

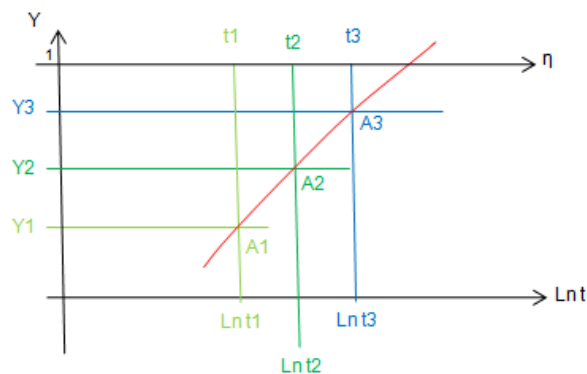


Figura 3.2. Intersección de los puntos t_1 , t_2 y t_3 .

5. Una vez obtenido el valor del parámetro “ γ ” se procedió a sumar algebraicamente este valor a la data inicial para obtener la nueva data que se graficará para la obtención de la recta en el papel de Weibull.
6. Trazando y prolongando una línea en la nube de puntos graficados, se cortó la horizontal x , donde pasa el punto de Weibull para obtener el valor del parámetro de escala (η).
7. Para obtener el parámetro de forma (β) se trazó una línea paralela a la tendencia del punto 4 hasta el punto de Weibull (origen x,y). Ésta línea corta la auxiliar “ b ” y se obtiene el parámetro forma (β)
8. Se determinó el tiempo promedio entre fallas (TPEF) de la data, usando la Ec. (3.4).

$$TPEF_{DATA} = \frac{\sum TEF}{n} \quad (3.4)$$

9. Se cálculo el tiempo promedio entre fallas de Weibull usando la Ec. (3.5). Los valores de A y B se tomaron de las tablas que se muestran en el Apéndice “A”.

$$TPEF_{WEIBULL} = A \times \eta + \gamma \quad (3.5)$$

10. Se procedió a calcular el porcentaje de error comparando TPEFDATA con el TPEFWEIBULL usando la Ec. (3.6). (el porcentaje de error debe ser menor a 5% para ser representativo de la data).

$$\%ERROR = \left| \frac{TPEF_{WEIBULL} - TPEF_{DATA}}{TPEF_{WEIBULL}} \right| \times 100 \quad (3.6)$$

11. Finalmente, se determinó la tasa de falla $\lambda(t)$, utilizando la Ec. (2.4).

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

3.4.3.1 Descripción del Software Weibull++

El software estima los parámetros de la distribución de manera rápida y sencilla, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Se inició el software Weibull++. (ver Fig. 3.4)

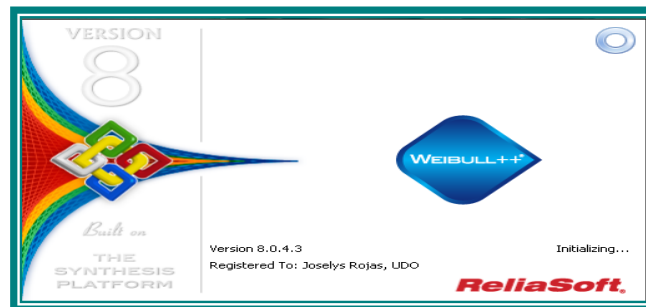


Figura 3.4. Ventana de presentación del Software Weibull^[16].

- Se ingresaron los TEF como se muestra en la Fig. 3.5 (pueden ingresarse de forma creciente o desordenados ya que el software los ordena automáticamente en forma creciente).

	Time Failed (Hr)
1	553
2	4604
3	487,8
4	498
5	4085
6	1581
7	1527

Figura 3.5. Ventana de ingreso de los tiempos entre fallas al Software Weibull++^[16].

- Se asignó un número ID a cada TEF. (Ver Fig. 3.6).

	Time Failed (Hr)	Subset ID 1
1	553	1
2	4604	2
3	487,8	3
4	498	4
5	4085	5
6	1581	6
7	1527	7

Figura 3.6. Ventana de números ID y tiempos entre fallas^[16].

- Se seleccionó la distribución. (ver Fig. 3.7).



Figura 3.7. Ventana de selección de la distribución de Weibull^[16].

- Se presionó el botón “calculate” (resaltado en el Apéndice “B”) para el cálculo de los parámetros.



6. Se presionó el botón “plot” (resaltado en el Apéndice “B”) para la obtención del gráfico. Se debe seleccionar el gráfico se desea ver ya que el software permite la visualización en gráficas de la probabilidad de Weibull, confiabilidad, desconfiabilidad y tasa de falla.

3.4.4 Análisis del árbol de fallas de las bombas G-2005A/B

El árbol de fallas de los equipos se realizó tomando como punto de partida el AMEF elaborado en la etapa 5, de éste se tomaron las fallas funcionales del sistema y se procedió a la deducción de las posibles combinaciones de eventos que podrían conducir a la ocurrencia de la falla; con la utilización de puertas lógicas se señalaron los resultados y eventos que se identificaron mediante la investigación en libros, manuales, guías, entre otros documentos.

Una vez elaborado el árbol de fallas se procedió a la verificación de los eventos que producen las fallas, soportado en ensayos, evaluaciones y entrevistas al personal de operaciones, mantenimiento y procesos.

3.4.5 Propuesta de mejoras al sistema de bombeo G-2005A/B

Una vez definidas y analizadas las causas de las fallas mediante el árbol de fallas del sistema, se procedió a realizar propuestas que deberán ser tomadas en cuenta para la disminución de la frecuencia de fallas en las bombas G-2005A/B.

Se determinaron números prioritarios de riesgos (RPN) para las causas de fallas encontradas usando la Ec. (3.7), basándose en las escalas de severidad, ocurrencia y detección de la norma SAE J-1739 presentadas en el Apéndice H.

$$NPR = S \times O \times D \quad (3.7)$$

Donde:

S= Severidad.

O= Ocurrencia.

D= Detección.

Se empleó el software Xfmea para la organización de las causas de fallas encontradas y de esta manera trabajar cómodamente con dichas causas. El procedimiento seguido para la utilización de este software se presenta a continuación:

1. Se inició el software Xfmea. (ver Fig. 3.8)

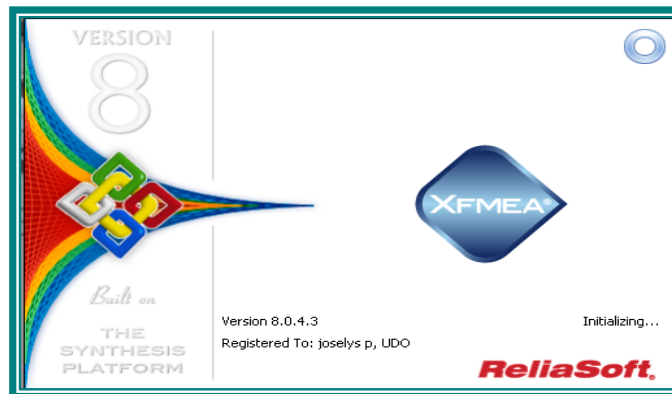


Figura 3.8. Ventana de Presentación del software Xfmea^[17].

2. Después de crear un nuevo repositorio se importó desde Microsoft Excel el documento correspondiente. (ver Figs. 3.9 y 3.10)

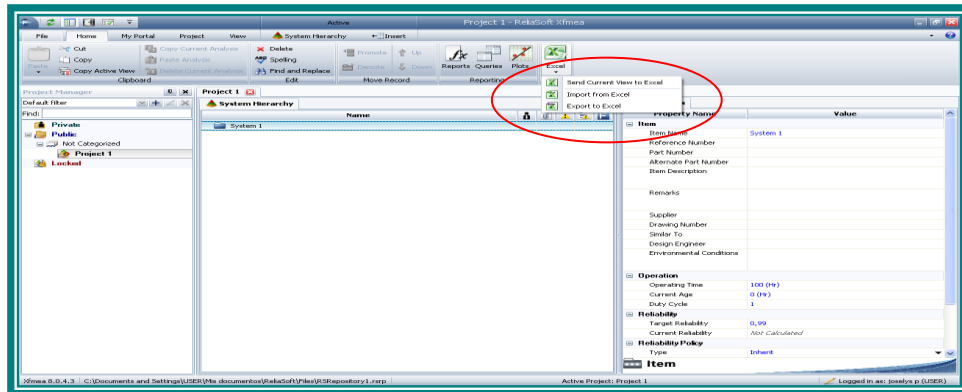


Figura 3.9. Ventana de importación desde Excel al software 1^[17].

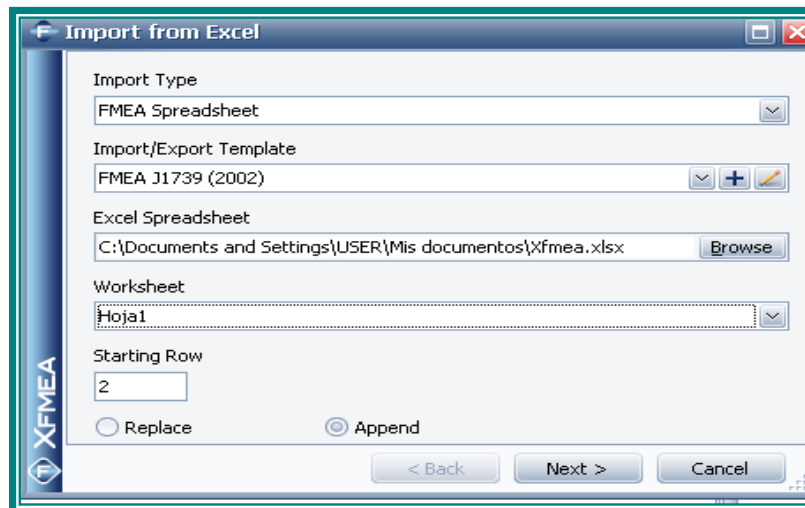


Figura 3.10. Ventana de importación desde Excel al software 2^[17].

Se organizó la información importada al software y se priorizaron las causas de fallas según la Tabla H.4 del Apéndice H, de esta manera se pudo definir cuál era la causa más crítica y empezar a realizar la propuesta tomando a esta causa como punto de partida.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1 Descripción del contexto operacional de las bombas G-2005A/B

La Fig. 4.1 muestra la vista general de la sección de reformación de la Unidad de Reformación Catalítica Continua (Reformación CCR).

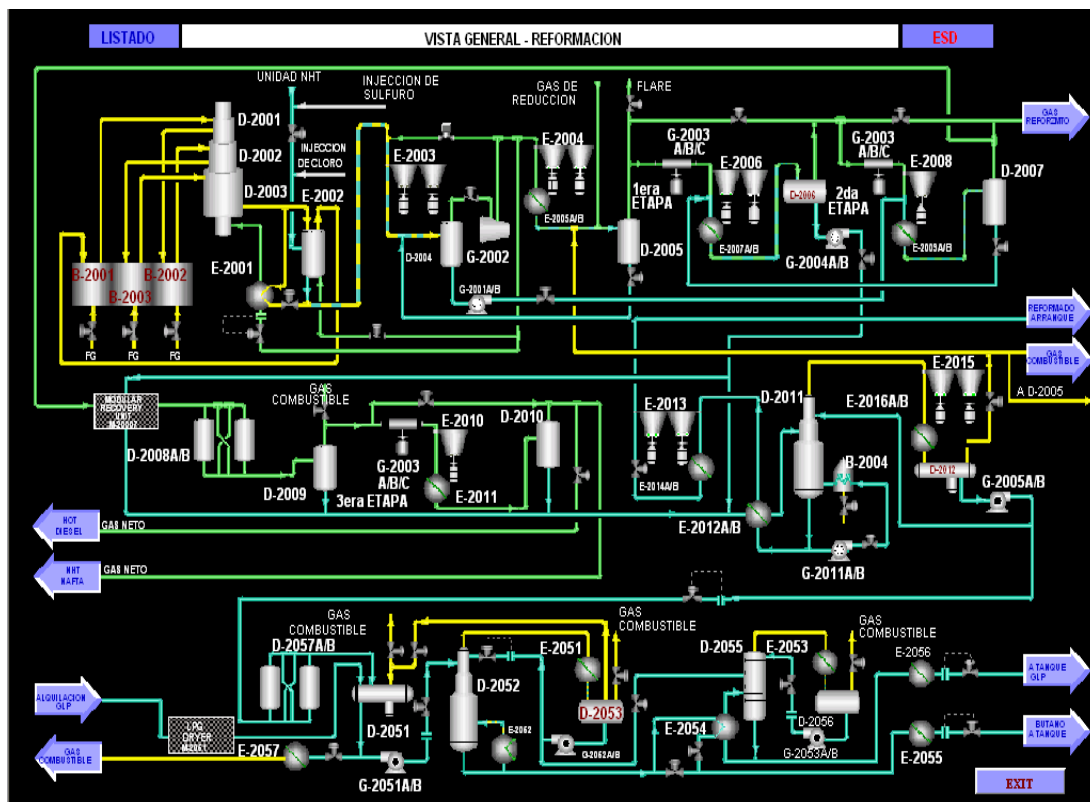


Figura 4.1. Vista general de la sección de reformación^[18].

La alimentación de la Unidad de Reformación Catalítica Continua (CCR) proviene de la Unidad de Hidrotratamiento de Nafta (NHT). El proceso



de reformación se lleva a cabo en una serie de sub-secciones, las cuales se describen a continuación junto con sus componentes.

4.1.1 Sub-sección de alimentación

La nafta proveniente de la Unidad de Hidrotratamiento de Nafta (NHT) es precalentada por el Intercambiador de Alimentación Combinada (E-2002); antes de entrar al intercambiador, se inyecta Percloroetileno por medio de la bomba de inyección química de arranque (G-2008). Después del intercambiador, se inyecta el condensado proviene del cabezal de agua tratada por medio de la bomba de inyección de químicos y condensados (G-2007) (ver Fig. 4.1).

4.1.2 Sub-sección del reactor

Existen tres (3) reactores montados en vertical (D-2001/2002/2003), la corriente de nafta es calentada a la temperatura del reactor en tres hornos calentadores, el Calentador de Carga (B-2001) y dos Intercalentadores (B-2002/2003), donde se mantiene constante la temperatura de entrada a cada reactor.

Una pequeña porción de gas de recicló rico en hidrogeno entra en los reactores por el fondo después de ser calentado en el Intercambiador de Purga de Reactor (E-2001).

El efluente del reactor es enfriado en los tubos del Intercambiador de Alimentación Combinada (E-2002), adicionalmente es enfriado en el Condensador de Productos (E-2003), antes de fluir hacia el Separador (D-2004).



4.1.3 Sub-sección del separador

En el separador (D-2004), el efluente previamente enfriado del reactor es separado en una corriente de hidrocarburo líquido que sigue hacia el re-contacto y una corriente de gas rico en hidrogeno hacia el fraccionamiento, una parte de éste es reciclado de vuelta a la sección del reactor vía el compresor de reciclo (G-2002), y es comprimido por el compresor de gas Neto (G-2003A/B/C).

Los hidrocarburos líquidos son dirigidos a la sección de re-contacto por las bombas del separador (G-2001A/B).

4.1.4 Sub-sección de re-contacto

El flujo de gas es dirigido hacia la sección de re-contacto de gas neto, la cual comprende una compresión a tres etapas de deshidratación del gas. En la sección de re-contacto de gas neto, casi todo el reformado y LPG restantes son removidos de la corriente de gas.

4.1.5 Sub-sección del debutanizador

En la Fig. 4.2 se presenta el esquema de la sección del debutanizador; esta sección sirve para remover los componentes livianos del reformado. El flujo líquido combinado de la sección de re-contacto es calentados en el Intercambiador de Alimentación al Debutanizador (E-2012A/B), y pasa al Debutanizador (D-2011), donde se realiza el fraccionamiento del reformado.

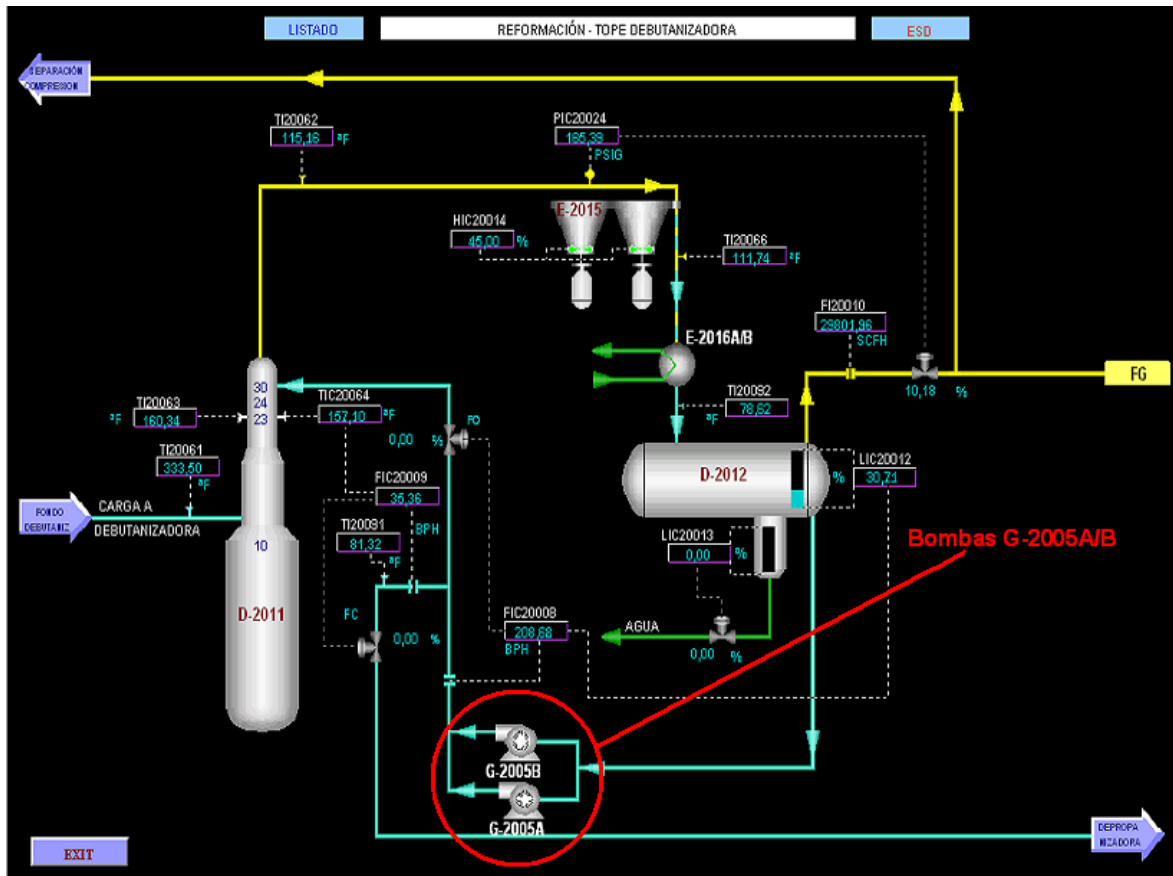


Figura 4.2. Ubicación de las bombas G-2005A/B^[18].

El producto vapor de tope es enfriado en el Condensador del Debutanizador (E-2015) y pasa al Condesador del Debutanizador (E-2016 A/B), y el condensado se colecta en el Tambor de Condensado del Debutanizador (D-2012) (ver Fig. 4.2). Las bombas de tope del Debutanizador (G-2005A/B) devuelven parte del líquido a la columna como reflujo, logrando de esta manera una mejor separación de los componentes, ya que este líquido condensado y frío absorbe calor a los vapores que ascienden en la torre ocasionando la condensación de las fracciones más pesadas que hayan llegado hasta la sección superior, de modo que éstas fluirán hacia abajo, de esta manera se controlan las pérdidas de producto de



fondo por el tope de la torre, así como también se puede controlar el perfil de temperatura del debutanizador. El LPG que no es usado como reflujo va a la sección de fraccionamiento de LPG.

4.1.5.1 Información de las bombas G-2005A/B

Las bombas G-2005A/B poseen una configuración estructural en paralelo, donde la bomba con la denominación A es la principal y está respaldada por la bomba B, la cual trabaja en modo de espera. Éstas se encuentran ubicadas en la planta de Hidroprocesos, específicamente en la Unidad de Reformación Catalítica, el cual es un ambiente abierto expuesto a la luz del sol, lluvia, viento, polvo y emanaciones de gases provenientes de las plantas de refinación que se encuentran dentro de la refinería Puerto la Cruz; éstas bombas funcionan 24 horas al día, manteniendo una presión de 170 psig en la succión y 230 psig en la descarga, para obtener un flujo de 292 GPM y una temperatura del fluido de 100 °F.

La superintendencia de mantenimiento de la planta Hidroprocesos de la RPLC posee un plan de mantenimiento trimestral nivel 2 según la norma PDVSA MM-01-01-03. En este nivel se realizan actividades de inspección no intrusiva, pruebas, ensayos no destructivos, mantenimiento de elementos que requieran o no paradas del activo y adicionalmente, monitoreo, registro de datos de mantenimiento y confiabilidad que permitan establecer la condición del elemento.

En la Tabla 4.1 se presenta la información técnica de las bombas G-2005A/B.



Tabla 4.1. Datos técnicos de las bombas G-2005A/B.

Equipo (TAG)	G-2005A/B
Función	Bombear LPG
Fluido manejado	Gas licuado de petróleo
Fabricante	Sulzer
Modelo	CAP 8
Tipo de bomba	Overhung (End-Top)
R.P.M.	3600
Año de fabricación	1995
P. De Succión (psig)	170
P. De descarga (psig)	230
Capacidad (GPM)	292

4.2 Determinación de los modos y efectos de fallas de las bombas G-2005A/B

A fin de determinar los modos de fallas en las bombas G-2005A/B se elaboró el AMEF correspondiente para así determinar cuál es el efecto que las fallas tienen sobre el activo. Cabe destacar que el AMEF realizado es válido para las bombas G-2005A/B ya que éstas presentan modos de fallas similares y cumplen la misma función dentro del contexto operacional.

En la Tabla 4.2 se muestra el AMEF de las bombas G-2005A/B, en éste se presentan las fallas y modos de fallas más recurrentes en las bombas, así como también el efecto observado al ocurrir la misma.




Tabla 4.2. Análisis de los modos y efectos de fallas de las bombas G-2005A/B.

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA		EFECTOS DE LAS FALLAS	
<p>Hoja de Información</p>	Sistema: Bombeo de reflujo del debutanizador D-2011			Realizado por: Joselys Rojas		Fecha: 28/05/12	
	Sub-sistema: Bomba G-2005A/B			Revisado por: Blair Martinez		Fecha:	
1	<p>Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM</p>	A	No bombea LPG	A1	Atascamiento del impulsor	Se detiene el giro del impulsor y no se entrega energía al fluido de proceso	
				A2	Fuga por sello mecánico	Escape del producto a la atmósfera ocasionando pérdida de la presión por lo cual el fluido no fluye por la tubería de descarga debe detenerse el equipo a fin de evitar daños en el personal y el medio ambiente	
				A3	Falla eléctrica	No hay transferencia de energía al fluido debido a que el motor se encuentra detenido por falta de electricidad	
		B	Presión de descarga menor a 237 psig	B1	Desgaste del impulsor	La bomba no entrega la presión requerida para bombear el reflujo hasta el tope del debutanizador	
				B2	Desgaste del sello mecánico	Escape de LPG a la atmósfera, baja presión de descarga	
				B3	Altos niveles de vibración	Daños en los componentes de la bomba y al personal de operaciones	
				B4	Holguras inadecuadas en los anillos de desgaste	Se produce recirculamiento del fluido de proceso a través de los anillos en la zona impulsor carcasa, lo que conlleva a la disminución de la presión de descarga	



Tabla 4.2. Análisis de los modos y efectos de fallas de las bombas G-2005A/B (continuación).

 Hoja de Información	Sistema: Bombeo de reflujo del debutanizador D-2011		Realizado por: Joselys Rojas	Fecha: 28/05/12	Hoja 2 de 2
	Sub-sistema: Bomba G-2005A/B		Revisado por: Blair Martinez	Fecha:	
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA		EFECTOS DE LAS FALLAS	
	C Caudal menor a 292 GPM	B5	Desgaste de la carcasa	Bajo nivel de transformación de la energía mecánica en energía hidráulica	
		B6	LPG fuera de especificación	Produce variaciones en las condiciones operacionales normales de las bombas, lo que origina su mal funcionamiento	
		C1	Fuga por partes del sellado	Fuga del producto por el sello mecánico o empaaduras a la atmósfera, produciendo un ambiente peligroso para el personal	
		C2	Filtro de succión tapado	Disminuye la entrada de LPG a la succión de la bomba, no se cumple con el estándar de operación ocasionando retraso en la producción	
		C3	Impulsor dañado	No fluye el caudal requerido	
		C4	Lubricación inadecuada de los rodamientos	Aumento de la temperatura de la caja de rodamientos y desbalance del eje	



4.3 Cálculo de la tasa de fallas del sistema de bombeo G-2005A/B

Para el cálculo de la tasa de fallas se determinaron los tiempos de operación (TO), tiempos fuera de servicio (TFS) y entre fallas (TEF). Estos tiempos se calcularon tomando en cuenta las fechas y horas presentadas en el Apéndice “D” para la bomba A y B, respectivamente, así como también se pueden observar las horas asociadas a cada fecha de paro.

En las Figs. 4.3 y 4.4 se muestran simbólicamente las fechas de paro y arranque de las bombas G-2005A/B, señalando los tiempos de operación, entre fallas y fuera de servicio de las bombas. Se utilizan las letras Φ_0 y Φ_1 para señalar los estados inoperativo y operativo respectivamente y en el eje de las abscisas se utiliza la letra t para señalar el tiempo de servicio.

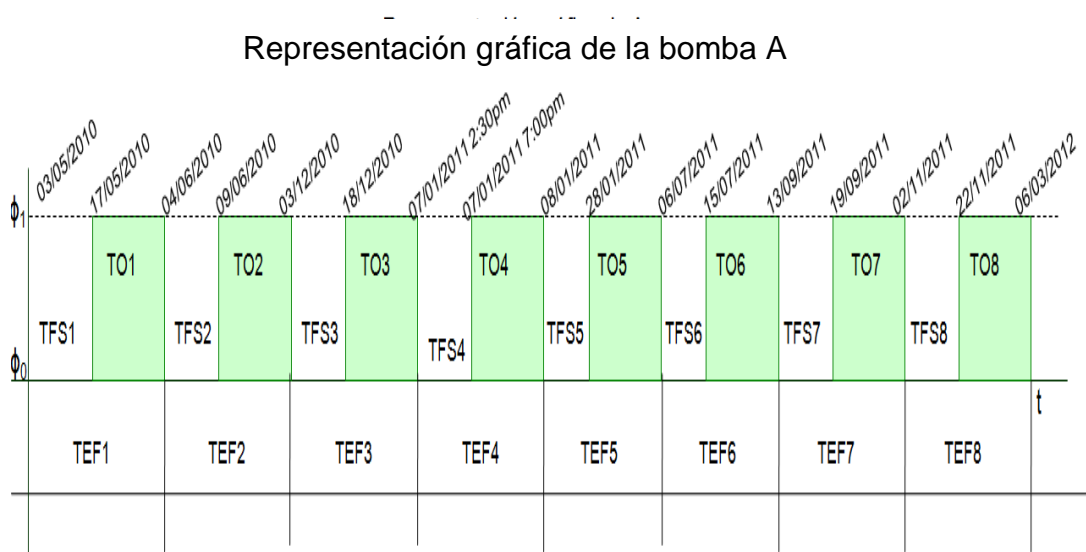


Figura 4.3. Fechas de paro y arranque de la bomba A.



Representación gráfica de la bomba B

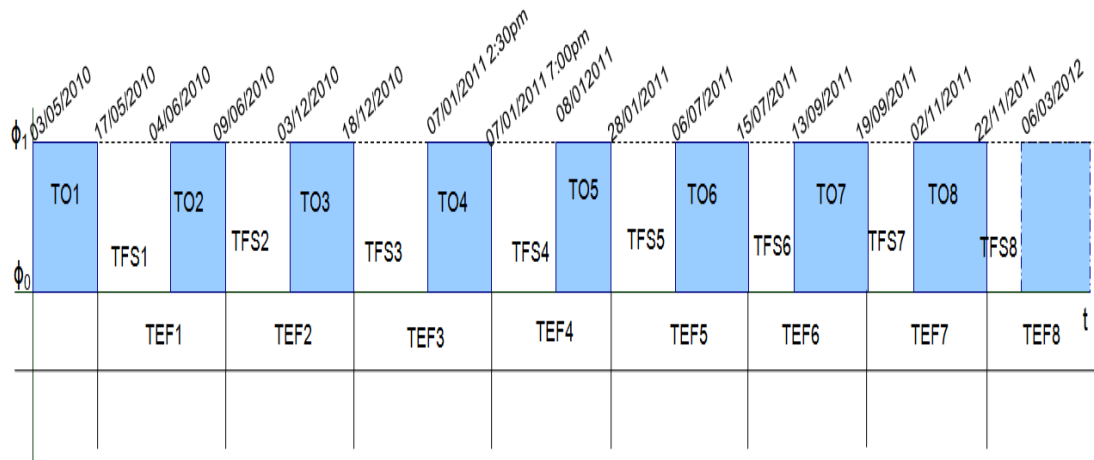


Figura 4.4. Fechas de paro y arranque de la bomba B.

4.3.1 Cálculo de la tasa de fallas

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.4.6 se procedió a calcular los parámetros del algoritmo de Weibull para el cálculo de la tasa de fallas de la bomba G-2005A.

1. Se calculó la función de frecuencia acumulada $F_{(i)}$ mediante la Ec. (3.1). La Tabla 4.3 muestra los TEF en forma creciente, el número ordinal “i” y la frecuencia acumulada de fallas.

Tabla 4.3. Tiempos entre fallas y frecuencia acumulada de la bomba G-2005A.

Ordinal (i)	TEF(h)	%F(i)
1	29,30	8,33
2	774,00	20,23
3	846,50	32,14



Tabla 4.3. Tiempos entre fallas y frecuencia acumulada de la bomba G-2005A. (Continuación)

4	1194,30	44,04
5	1651,70	55,95
6	3006,00	67,85
7	4345,00	79,76
8	4361,00	91,66

2. Una vez graficados los puntos de la Tabla 4.5, se calculó el valor de Y_2 con la Ec. (3.3). Se tomaron como puntos $A_1=774$; 20,23 y $A_3=4345$; 79,76 (ver Fig. 4.5).

$$Y_2 = \frac{79,762 + 20,238}{2}$$

$$Y_2 = 50$$

3. Graficando Y_2 se tiene que $t_2= 1400$ (ver Fig. 4.5); sustituyendo en la Ec. (3.2) se tiene que:

$$\gamma = \frac{1400^2 - 744 \times 4345}{2 \times 1400 - 774 - 4345}$$

$$\gamma = 605,015$$

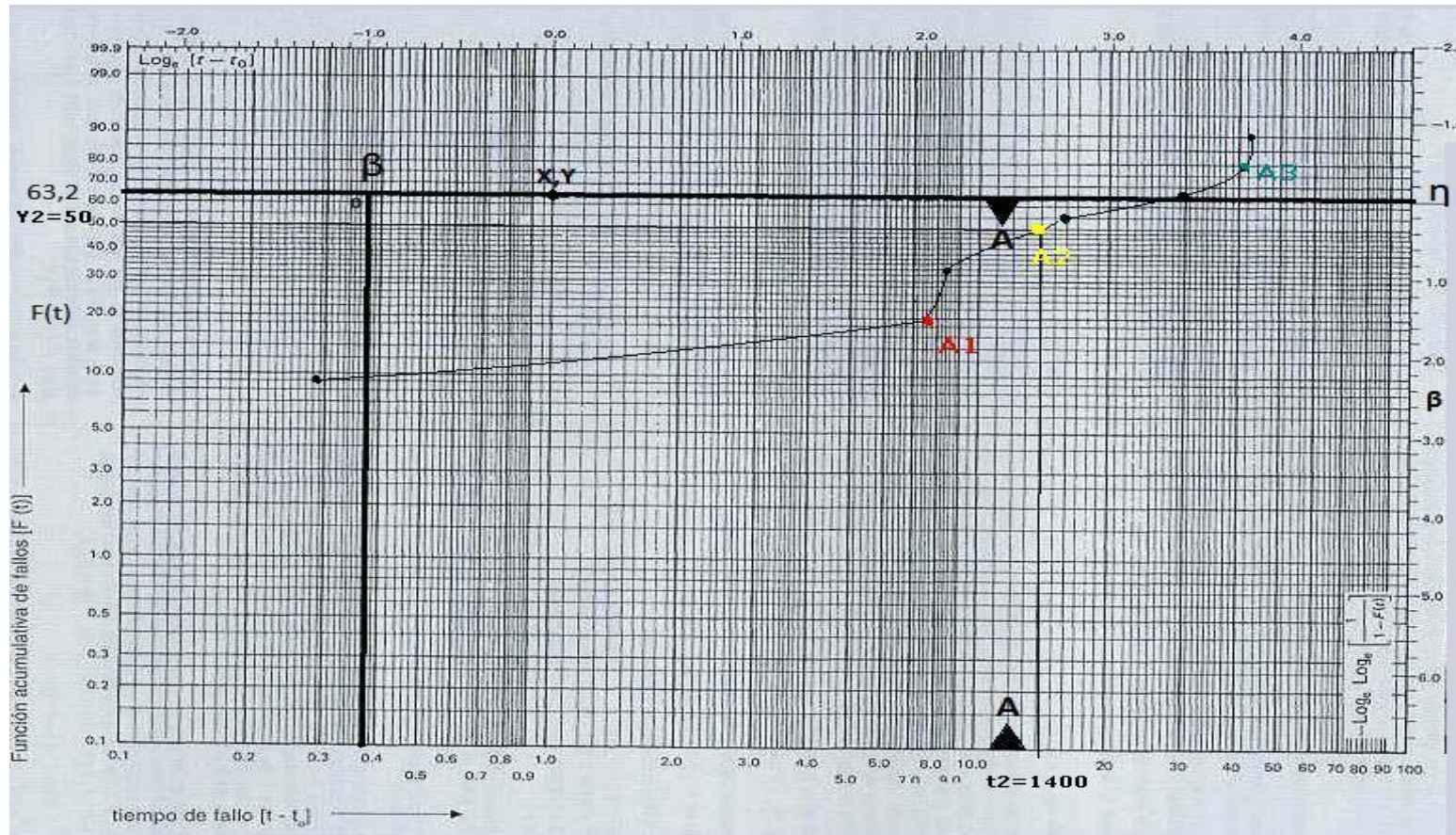


Figura 4.5. Gráfica de Weibull para la bomba G-2005A.



4. La data que resultó de la suma algebraica del parámetro “ γ ” a cada uno de los puntos se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G-2005A restando el parámetro γ .

Ordinal (i)	TEF(h)	%F(i)
1	634,31	8,33
2	1379,01	20,23
3	1451,51	32,14
4	1799,31	44,04
5	2256,71	55,95
6	3611,01	67,85
7	4950,01	79,76
8	4966,01	91,66

5. En la Fig. 4.6 se muestra la gráfica de los tiempos entre fallas contra %F(i) en el papel de Weibull. De la gráfica se obtuvo que los valores de los parámetros de forma (β) y de escala (η) son, respectivamente, 2,1 y 2400.
6. Con el valor de β se encontró el valor de $A=0,8857$ y $B=0,443$ mostrados en el Apéndice “A”.
7. Luego se determinaron los $TPEF_{DATA}$ y $TPEF_{WEIBULL}$ con las Ecs. (3.4) y (3.5), respectivamente.

$$TPEF_{DATA} = \frac{21047,92}{8} = 2630,99$$



$$TPEF_{WEIBULL} = 0,8857 \times 2400 + 605,015 = 2730,695$$

8. Una vez determinados los $TPEF_{WEIBULL}$ y $TPEF_{DATA}$ se procedió a calcular el porcentaje de error mediante la Ec. (3.7).

$$\%ERROR = \left| \frac{2730,695 - 2630,99}{2730,695} \right| \times 100$$

$$\%ERROR = 3,65\% < 5\%$$

9. Se presentó la ecuación de tasa de falla en función del tiempo.

$$\lambda = 8,75E^{-4} \left(\frac{T-605,015}{2400} \right)^{1,1} \quad (4.1)$$

Haciendo referencia al contexto operacional de las bombas donde se señala que la frecuencia de mantenimiento es trimestral, se calculó la tasa de fallas para 90 días (2160 horas) usando la Ec. (4.1).

$$\lambda = 5,429^{-4} \text{ fallas/horas}$$

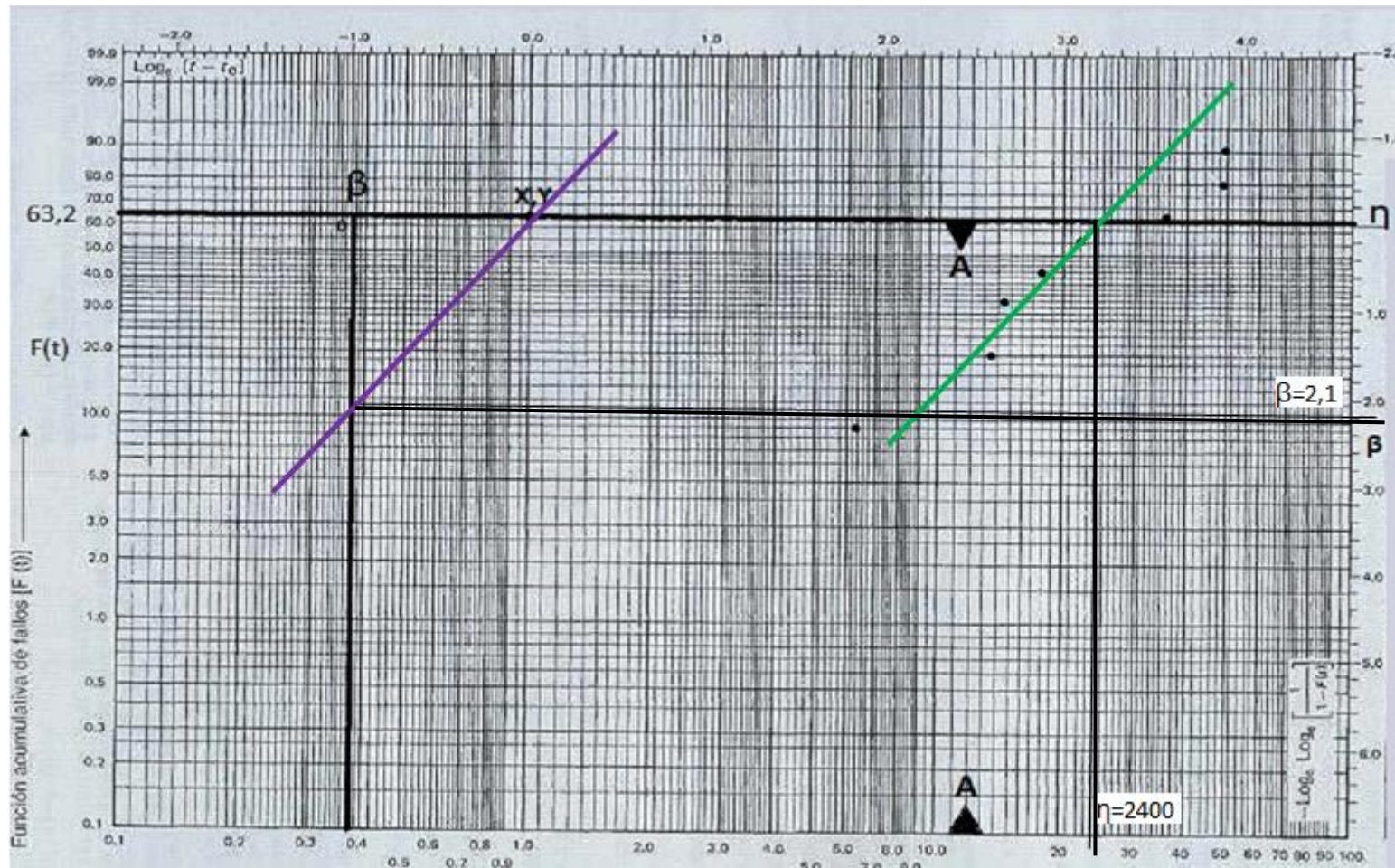


Figura 4.6. Gráfica de Weibull con rectificación para la bomba G-2005A.

- Línea auxiliar, paralela a la tendencia.
- Línea de tendencia de la curva de Weibull.



4.3.2 Análisis de la tasa de fallas y de los parámetros de Weibull

Con los datos del Apéndice “D” se inició el cálculo de la tasa de fallas de la bomba G-2005A utilizando el software Weibull++ siguiendo el procedimiento mostrado en la sección 3.4.6.1.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados suministrados por el Software para los parámetros de forma (β), escala (η) y posición (γ). Se puede observar que la bomba G-2005A presenta un parámetro β ligeramente mayor de 1, lo cual es indicativo que este equipo comienza su etapa de desgaste según la curva de la bañera, donde la tasa de falla incrementa con el tiempo de forma continua como se puede apreciar en la Fig. 4.7, con un comportamiento cóncavo que es representativo de $\beta > 1$. El valor del parámetro de escala (η) fue de 2539,855 horas lo que permite establecer que para este tiempo el equipo posee una confiabilidad de 36,8 %. Se debe advertir que para este tiempo el equipo debe ser intervenido. El parámetro de posición (γ) resultó ser negativo, esto es indicativo de que el equipo fallará antes de su puesta en marcha, sin embargo, un equipo no puede fallar antes del arranque, por lo cual este resultado puede interpretarse como que el equipo presentará una falla en un tiempo breve después de su puesta en marcha. El valor del parámetro de posición negativo incita a pensar que existieron datos del equipo que no fueron tomados en cuenta al momento de realizar los cálculos, es decir, existieron fallas antes del período de estudio que no se registraron y no fueron tomadas en cuenta para el análisis; por lo cual se deduce que el inicio de los tiempos de la Tabla 4.3 es uno diferente al que aparece en la misma.



Tabla 4.5. Resultados del análisis con el uso del software Weibull++ para la bomba G-2005A.

Análisis resumido	
Parámetros	
Beta	1,052535
Eta (h)	2539,85586
Gamma (h)	-182,65875

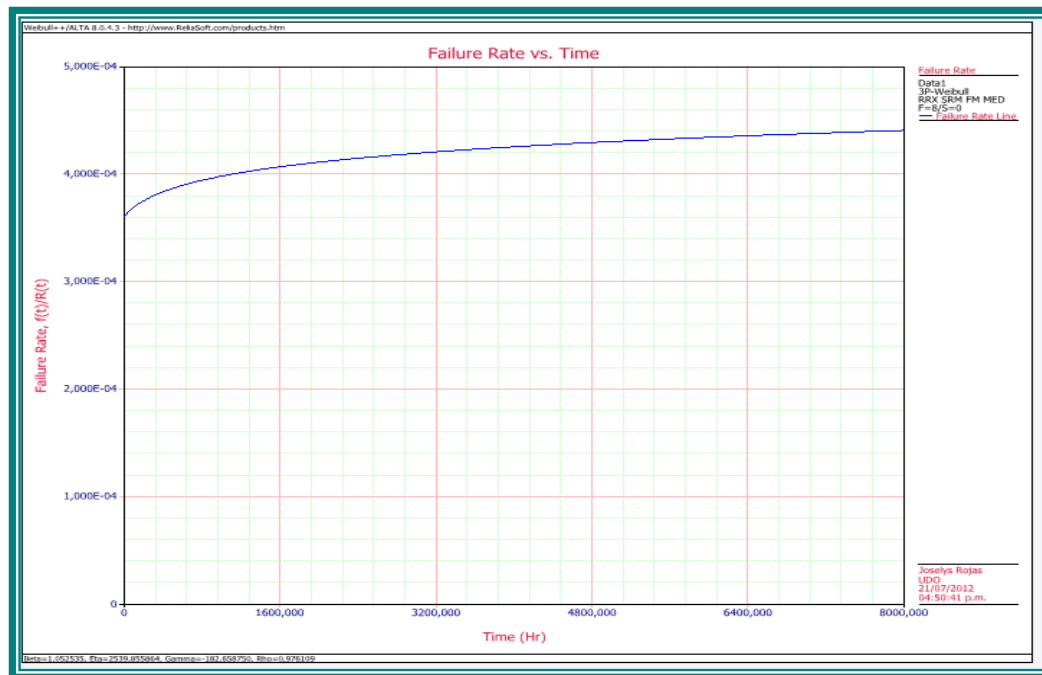


Figura 4.7. Tasa de fallas para la bomba G-2005A.

Los resultados obtenidos por el software para la bomba G-2005B se presentan en la Tabla 4.6, observándose que esta bomba presenta un comportamiento similar al de la bomba G-2005A con un valor del parámetro de forma $\beta = 1,09$, indicativo de que el equipo se encuentra en etapa de desgaste, donde la tasa de fallas va incrementando con el tiempo siguiendo un comportamiento característico de un patrón de fallo “D” como se puede observar en la Fig.4.7. El valor del parámetro de escala fue de $\eta = 2263,213$ horas. Para este tiempo la probabilidad de que el equipo falle será de 63,2%,



sumado al valor del parámetro de posición, el equipo presenta una vida característica de 2171,531 horas. Al igual que en la bomba G-2005A, el parámetro de posición resultó ser negativo, esto significa que el equipo fallará en un tiempo breve después de su puesta en marcha.

Tabla 4.6. Resultados del análisis con el uso del software Weibull++ para la bomba G-2005B.

Análisis resumido	
Parámetros	
β	1,093281
η (h)	2263,21380
γ (h)	-91,682

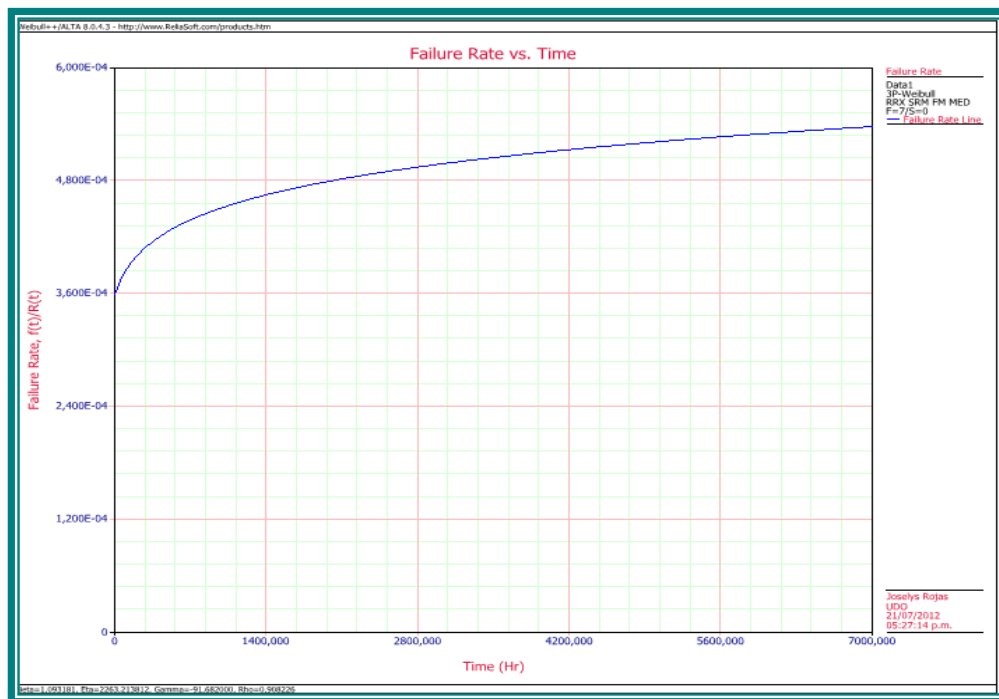


Figura 4.8. Tasa de fallas para la bomba G-2005B.



Al comparar los resultados presentados en la Tabla 4.5 con los obtenidos en la sección 4.3.1 se puede notar que los resultados discrepan entre ellos, presentándose $\beta = 2,1$ para el método gráfico y $\beta = 1,05$ por el software Weibull++, ambos resultados ubican al equipo en la etapa de desgaste; dada la diferencia entre estos valores se debe recordar que la tendencia de los puntos en el papel de Weibull fue una curva y la apreciación de ésta es visual por lo cual puede variar para cada persona que realice el estudio. Queda evidenciado que la obtención de los parámetros por el método gráfico, es poco precisa, lo que puede conducir a errores en el análisis. Caso contrario se presenta al utilizar el software Weibull++ que modela los datos pudiéndose obtener resultados más representativos de la data en cuestión. Los resultados del método gráfico para la bomba B se muestran en el Apéndice E. El resultado del parámetro de escala obtenido por el método gráfico fue de 2400 horas, mientras que el presentado por el software fue de 2539,855, estos resultados fueron para la bomba A.

4.4 Análisis el árbol de fallas del sistema de bombeo G-2005A/B

Para determinar las causas de fallas en las bombas G-2005A/B se elaboró el árbol de fallas de las bombas presentado en la Fig.4.9. A continuación se describen los resultados correspondientes a las evaluaciones aplicadas a cada evento del árbol de fallas para su comprobación.

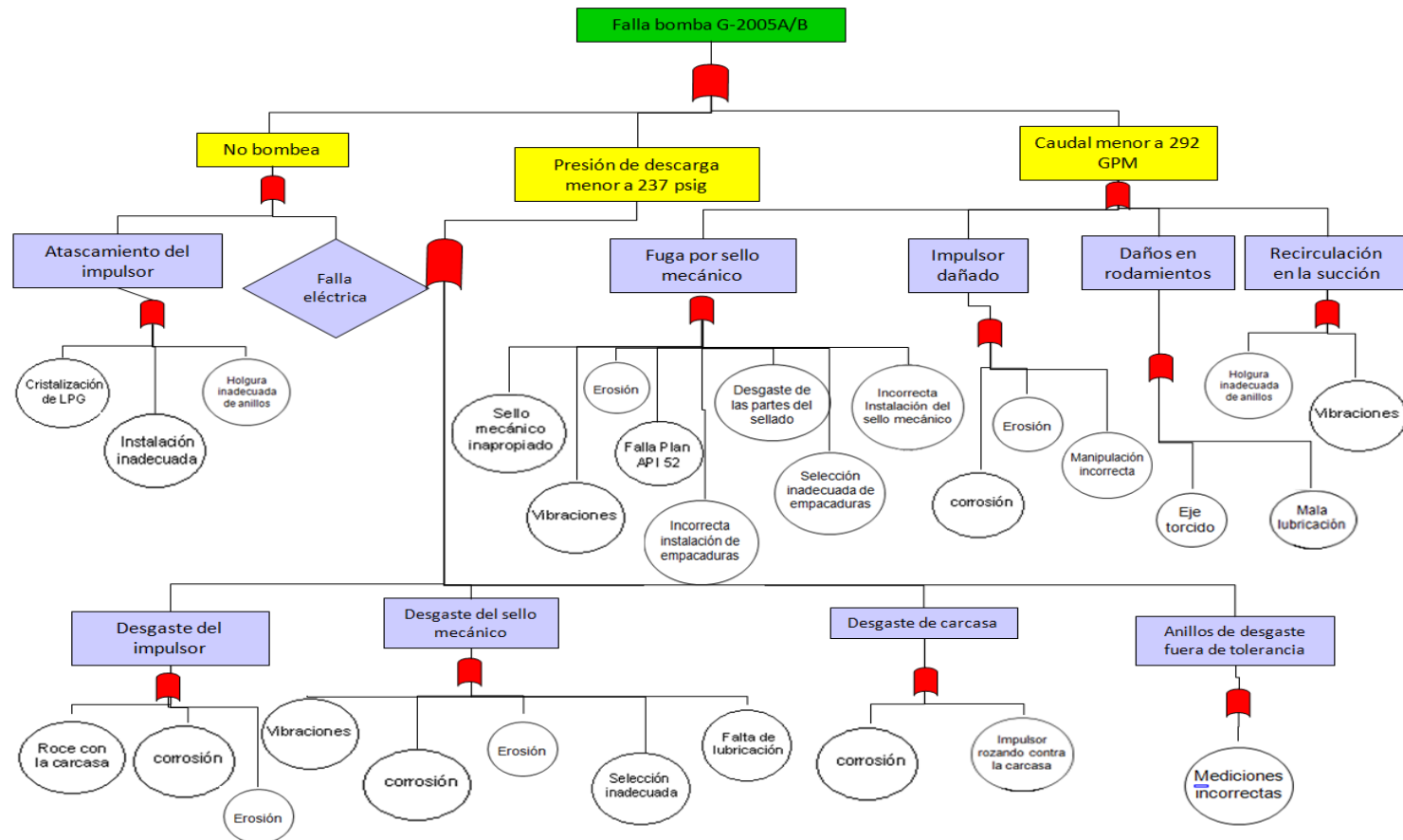


Figura 4.9. Árbol de fallas de las bombas G-2005A/B



4.4.1 No bombea

Para la evaluación y análisis de los resultados, se desglosó el árbol de fallas en tres partes partiendo de los tres resultados principales que ocasionarían el resultado tope. Esto se hizo con la finalidad de facilitar la comprensión del análisis.

En la Fig. 4.10 se muestra la primera parte del árbol de fallas, los eventos se evalúan a continuación.

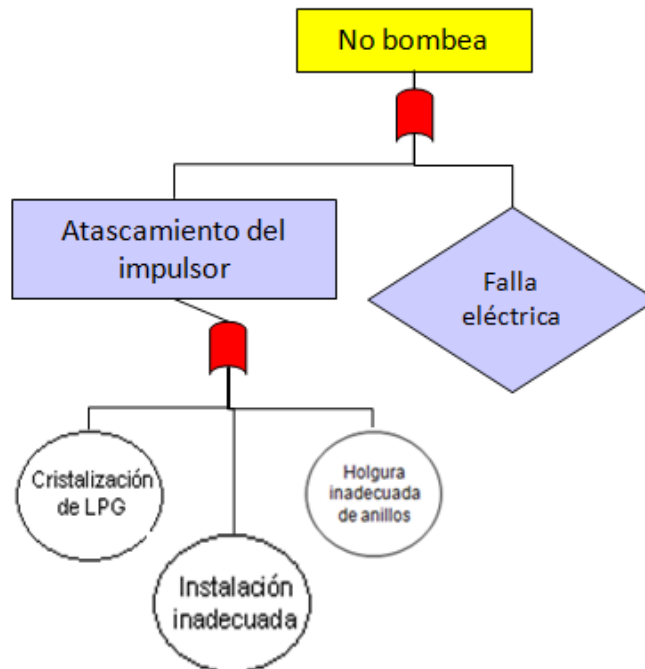


Figura 4.10. Árbol de fallas (primera parte).

4.4.1.1 Atascamiento del impulsor

Para la evaluación de este punto se determinó cuales eran los eventos base que podrían afectarlo, basándose en los informes técnicos y en las



entrevistas informales hechas al personal de mantenimiento, operaciones y procesos.

Los eventos base que se identificaron como posibles causas para llegar al atascamiento del impulsor se evaluaron de la siguiente manera:

4.4.1.1.1 *Cristalización de LPG*

Para la verificación de este evento se realizaron visitas al Taller Central de la Refinería Puerto La Cruz donde se encontraba la bomba G-2005B por presentar una falla operacional. Se observó que el impulsor del equipo así como también los anillos y el eje, se encontraban cubiertos por un material sólido de color verdusco el cual impedía la rotación normal del impulsor. Se realizaron entrevistas al personal de procesos de la RPLC encargado de la unidad donde se encuentran las bombas y se realizaron ensayos del material de color verdusco, confirmándose la presencia de compuestos formados por cloro y hierro, llegando a la conclusión de que el ensuciamiento era producto de reacciones químicas que tienen lugar aguas arriba a la bomba.

Actualmente, se presenta una desviación en las reacciones químicas en el catalizador de reformado causadas por problemas con el despojamiento de cloro en el sistema y como resultado se tiene la presencia de materiales extraños en el fluido que se solidifican en las partes rotativas y estáticas del equipo como se observa en la Fig. 4.11.

De acuerdo a lo descrito anteriormente se confirma que una de las causas de fallas es por cristalización de producto.



Figura 4.11. Impulsor de la bomba G-2005B.

4.4.1.1.2 Instalación inadecuada

Durante la estadía en el Taller Central se pudo observar que el ensamblado de las piezas de los equipos rotativos, está en las manos de personal altamente capacitado para este trabajo y se cumple con el procedimiento para la realización de mantenimiento de las bombas. Se realizan mediciones antes, durante y después del ensamblado de las piezas, se toma nota en formatos donde se presentan las tolerancias máximas y mínimas para las diferentes partes de la bomba; por lo cual se minimiza el riesgo de equivocaciones durante el mantenimiento; se descarta este evento como causa de falla.

4.4.1.1.3 Holgura inadecuada de anillos

Se verificó mediante la observación directa que la tolerancia entre los anillos de desgaste de las bombas son medidas con los instrumentos adecuados para esta tarea, como el tornillo micrométrico y el reloj comparador, así como



también las actividades son realizadas bajo la presencia del supervisor de equipos rotativos, lo cual disminuye el porcentaje de error al momento de tomar las mediciones. Se descarta este evento como causa de falla.

4.4.1.2 Falla eléctrica

Este evento se refiere a un problema externo (CADAFE, transmisión y distribución). Si se presenta una falla la energía eléctrica en la Planta de Hidroprocesos, el Sistema Eléctrico de VALCOR se conecta con los turbo-generadores de RPLC los cuales suministran energía sólo a los equipos más críticos de la Planta de Hidroprocesos. Las bombas G-2005A/B no entran en esta categoría, por esto se confirma este evento como una causa de falla.

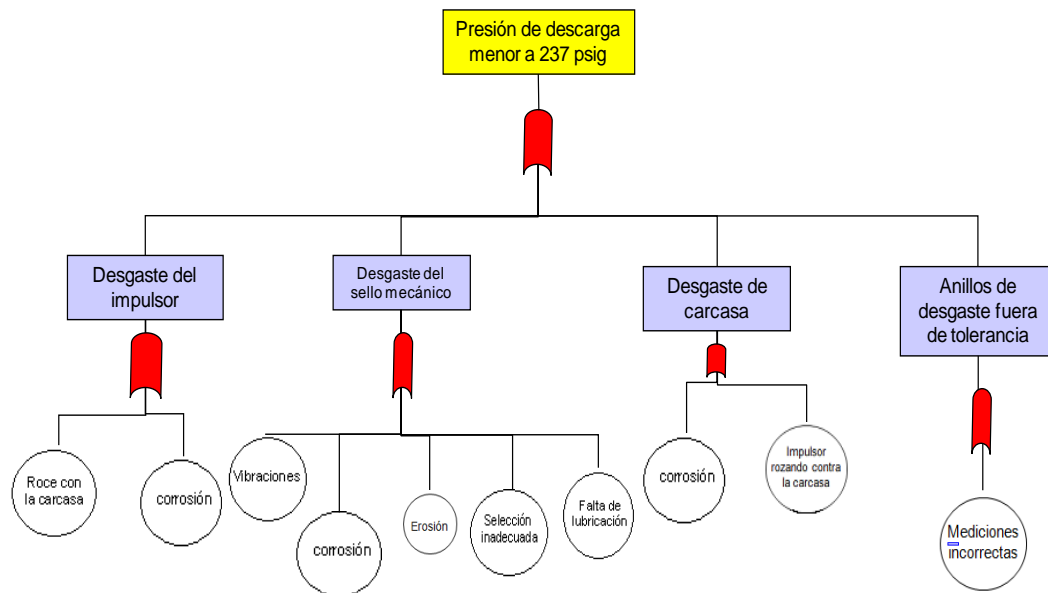


Figura 4.12. Árbol de fallas (segunda parte).

4.4.2 Presión de descarga menor a 237 psig.

En la Fig. 4.12 se presentan los eventos a evaluar para la segunda parte del árbol de fallas.



4.4.2.1 Desgaste del impulsor

Los eventos base presentados en la Fig. 4.12 que se identificaron como causa de falla para el evento “desgaste del impulsor” fueron comprobados de la siguiente manera:

4.4.2.1.1 Roce con la carcasa

Este evento se verificó realizando visitas a taller central; se observaron las técnicas empleadas para la instalación del impulsor, ya que una mala instalación puede ocasionar el desbalance de este elemento pudiendo causar el rozamiento contra la carcasa. Se observó que la instalación en el taller se realiza empleando los materiales y procedimientos planteados en los formatos del taller central los cuales son necesarios para una instalación correcta. Descartándose este evento como causa de falla.

4.4.2.1.2 Corrosión

Durante el último mantenimiento que se le realizó a la bomba G-2005 B para reemplazo del sello se pudo observar un producto sólido de color verdusco adherido a los componentes, estos pudieron ser inspeccionados visualmente (ver Fig. 4.11); así mismo muestras de este producto fueron recolectadas y enviadas a PDVSA INTEVEP para su análisis; donde se encontró evidencia de HCL en el sistema.

El impulsor de la bomba no presentó evidencia de daño por corrosión por parte de los sólidos que están presentes en la corriente. Este componente fue inspeccionado posterior a su limpieza, así mismo en la voluta de la bomba se observó el producto sólido adherido a las paredes, sin detectarse un mecanismo de corrosión agresivo.



El sello de la bomba fue inspeccionado visualmente y enviado a PDVSA INTEVEP para realizarle un análisis metalográfico. El sello utilizado por las bombas G-2005 A/B es de acero inoxidable 316, el cual, bajo presencia de cloro, es susceptible a fallar por agrietamiento bajo tensiones. Este tipo de ataque no se observó durante la inspección visual, sólo se observó pequeñas irregularidades superficiales. A nivel microestructural, el informe de PDVSA INTEVEP indica que no se observó la presencia de grietas asociadas a esas irregularidades, lo cual disminuye la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de degradación por HCl.

La evaluación ha generado evidencias que permiten confirmar la presencia de HCl en el sistema. Este HCl aún no ha generado daños graves en los componentes aleados, sin embargo, existe la posibilidad de que en el futuro las concentraciones puedan incrementarse y generar fallas en los componentes de las bombas fabricados de aceros inoxidables. Adicionalmente, la presencia de cloro puede ser precursora de la aceleración de algún mecanismo de corrosión que pudiese activarse. No se descarta este evento como causa de falla.

4.4.2.2 Desgaste del sello mecánico

Las causas que se verificaron para que este evento pueda suceder fueron: vibraciones, corrosión, erosión, selección inadecuada del sello mecánico y falta de lubricación.

El evento “corrosión” fue evaluado en la sección anterior, por lo tanto no será evaluado nuevamente. Se mostrará a continuación el análisis para los eventos restantes.



4.4.2.2.1 Vibraciones

Es importante señalar que los equipos no tienen un monitoreo de vibraciones fijo. La verificación de este evento se realizó con el historial de tendencias de vibraciones de ambos equipos.

En la Fig. 4.13 se muestra la tendencia de vibración de la bomba G-2005A y en la Fig. 4.14 se presenta la frecuencia de vibración asociada a la última medición de vibración en el plano horizontal. En el Apéndice “G” se muestran las gráficas de vibración para el plano vertical de la Bomba con la designación A y las gráficas de vibración para los planos horizontal y vertical de la bomba B.



Figura 4.13. Comportamiento “Overall Value” en función del tiempo de la bomba G-2005A.

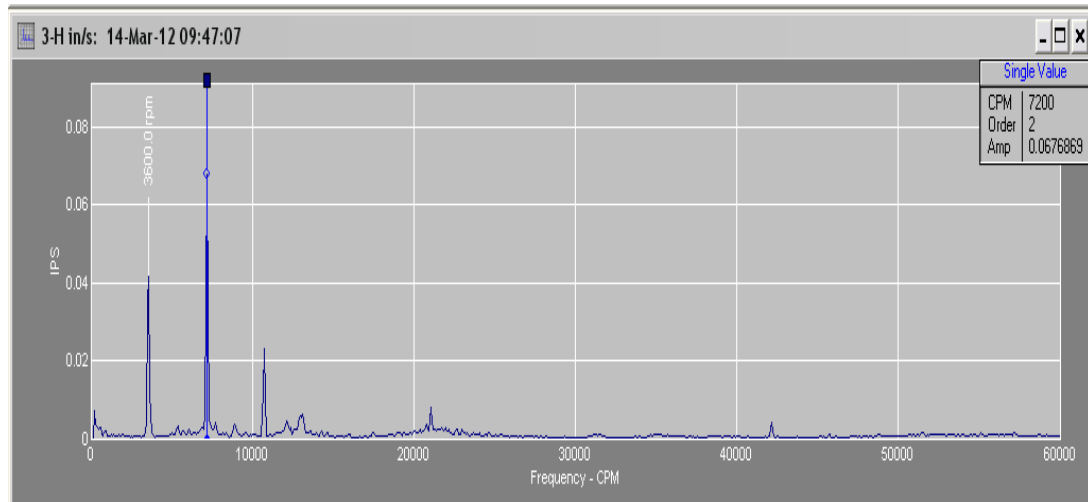


Figura 4.14. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005A plano horizontal).

De acuerdo con la norma ISO 10816-1, presentada en el Apéndice G, las bombas G-2005A/B pertenecen a la clase de equipos II por poseer un valor de potencia menor a 75 kW. Relacionando las Figs. 4.14 y G.1 se observa que los valores de vibración para la bomba A son catalogados como buenos. Presentándose valores similares para la bomba con la designación B los cuales son catalogados como buenos. Estas gráficas se presentan en las Figs. G.3 y G.4 del Apéndice G. Para el tiempo de estudio se puede descartar las vibraciones como causa de falla.

4.4.2.2 Erosión

Inspecciones realizadas al impulsor de la bomba en el último mantenimiento, no evidencian daño por erosión por parte de los sólidos presentes en la corriente. Sin embargo se debe tener presente la existencia de sólidos como el hierro encontrado en análisis realizados por PDVSA INTEVEP mediante difracción y dispersión de rayos X, tomando en cuenta que podrían ocasionar daños considerables en las partes de la bomba al impactar contra éstas



mientras el fluido de proceso pasa por la bomba. No se descarta este evento como causa de falla

4.4.2.2.3 Selección inadecuada de sello mecánico

Se realizó la verificación de las características del sello mecánico empleado, para comprobar si este soportaba temperaturas de 100 °F y presiones de 237 psig, presentadas en el proceso según los datos técnicos de la bomba.

De acuerdo con el plano mostrado en el Apéndice F, aportado por la empresa Burgmann mechanical seal, el modelo del sello mecánico utilizado en las bombas es H75VK; para su construcción el fabricante se basa en la norma API 682 “Sistemas de sellado de eje para bombas centrífugas y rotativas”, las características de este sello son las que se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Características del sello mecánico.

Características del sello mecánico	
Arreglo	Doble tipo cartucho
Diseño	API 682 / ISO 21049
Categoría	2 y 3
Tipo	A
Disposición	2 o 3

En cuanto a la categoría, su aplicación se limita a sellar cámaras con temperaturas desde -40 °C (-40 °F) a 400 °C (750 °F) y presiones absolutas de hasta 4,2 MPa (42 bar) (615 psi).

Es un sello balanceado tipo A, montado en el interior del equipo con un diseño tipo cartucho con resortes de empuje múltiple.



Es un sello en disposición 3, por lo cual su configuración consta de dos sellos tipo cartucho que utilizan un fluido barrera suministrado desde el exterior.

Las características del sello usado son las apropiadas para cumplir con los requerimientos de operación, por lo cual queda descartado este evento como posible causa de falla.

4.4.2.2.4 Falta de lubricación

La lubricación inadecuada en este sello es producto de una falla en el plan API 52 el cual es el encargado de lubricar el sello externo de la bomba. La falla del plan API 52 fue descartada como causa de falla de las bombas, sin embargo, la presencia de desviaciones en las propiedades del fluido de proceso puede provocar el funcionamiento incorrecto del plan API 52. Esta falla no sería propia del plan sino provocada por el cambio en las propiedades del fluido, por lo cual no se cumple con las condiciones operacionales para el buen funcionamiento del plan API, lo que dificulta la correcta lubricación del sello mecánico. Si las propiedades del fluido cambian, y éstas afectan el correcto funcionamiento del plan API se produce una insuficiencia en la lubricación del sello. Deberían tomarse medidas para inhibir las variaciones de las reacciones químicas y de esta manera no se produzcan cambios en las propiedades del fluido. No se descarta este evento como causa de falla.

4.4.2.3 Desgaste de la carcasa

La verificación de los eventos base para este punto fue realizada previamente. Para la evaluación del evento “impulsor rozando contra carcasa” leer la sección 4.4.2.1.1 “roce con carcasa”. El evento corrosión fue evaluado y no se descartó como causa de falla.

4.4.2.4 Anillos de desgaste fuera de tolerancia

La evaluación de este evento se analizó en la sección 4.4.1.1.3, donde se verificó que las tolerancias de los anillos eran medidos con precaución y usando los instrumentos diseñados para esta tarea.

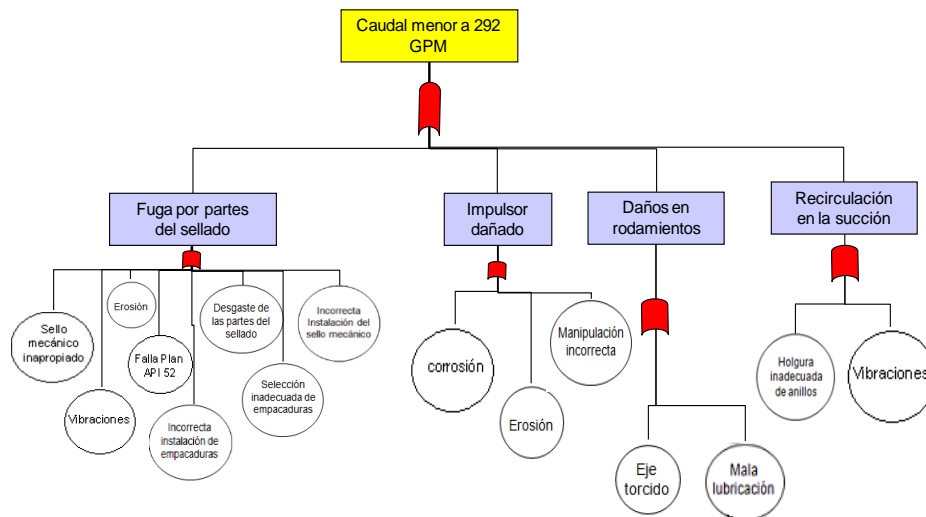


Figura 4.15. Árbol de fallas (tercera parte).

4.4.3 Caudal menor a 292 GPM

4.4.3.1 Fuga por partes del sellado

En inspecciones realizadas al sello mecánico de la bomba no se observó desgaste por corrosión ni erosión de las partes del sellado de la bomba. Estas observaciones fueron afianzadas por los análisis realizados al sello mecánico en PDVSA INTEVEP, dando como resultado que no existía desgaste de las partes del sello.

Mediante observación directa se confirmó que la selección e instalación de las empaaduras se realiza de manera apropiada usando los materiales e instrumentos requeridos para este trabajo.



En cuanto a la instalación de los sellos mecánicos, se verificó el montaje de los sellos en el taller central de la RPLC. Se comprueba que las dimensiones del sello mecánico sean las correctas comparando las medidas con las que aporta el plano del sello mecánico, así mismo la instalación del sello en la bomba se realiza con mucho cuidado, protegiendo las partes del sello en todo momento.

Por lo descrito anteriormente se descartan los eventos “desgaste de las partes del sellado”, “incorrecta instalación de empaaduras”, “incorrecta instalación de sello mecánico” y “selección inadecuada de empaaduras” como causa de falla para “fuga por partes del sellado”.

4.4.3.1.1 Falla Plan API 52

Las bombas G-2005A/B poseen un plan API 52 (ver Fig. 4.16). Adicional a éste poseen un plan API 11. Para la comprobación de este evento se realizaron visitas a la planta para verificar el estado en el que se encuentran los pots de sello en el caso del plan API 52, observándose que no se presentan fisuras o fugas en el reservorio o en las tuberías que llevan el fluido barrera desde el pote hasta el sello externo. Cabe destacar que los visores para verificar si existe o no fluido barrera no se encuentran limpios, lo cual dificulta la visión al interior del reservorio. Informes presentados por el personal de servicios técnicos reflejan pérdida del fluido barrera; al realizar entrevistas al personal sobre este punto, se llegó a la conclusión de que no se sabe si el reservorio está completamente lleno o vacío, por lo cual se presenta el escenario más desfavorable, donde no se observa aceite de barrera y se realizan lavados al pote del sello colocando el nivel del aceite barrera en el punto correspondiente.



Esta desviación en el nivel de aceite barrera en el plan API 52 se debe a variaciones en las condiciones del fluido de proceso y no en una falla propia del plan, ya que este se encuentra en buen estado y se podría mejorar la visión al nivel del aceite realizando una limpieza al visor, por lo cual se puede descartar la falla del plan API 52 como causa de falla de los equipos.



Figura 4.16. Reservorio y tuberías del plan API 52 de la bomba G-2005A.

Los demás eventos, “vibraciones”, “erosión” y “sello mecánico inapropiado” fueron evaluados en las secciones 4.4.2.2.1., 4.4.2.2.2. y 4.4.2.2.3 respectivamente.

4.4.3.2 Impulsor dañado

La corrosión, erosión y manipulación incorrecta del impulsor fueron evaluados previamente en el trabajo de grado.



4.4.3.3 Daños en rodamientos

4.4.3.3.1 Eje torcido

Se verificó en el taller de la refinería que se realizan medidas del eje de la bomba para verificar la rectitud del mismo para que los rodamientos puedan colocarse de manera correcta. Se descarta este evento como causa de falla, debido a que las mediciones se realizan de manera rigurosa.

4.4.3.3.2 Mala lubricación

La planta de Hidroprocesos utiliza un sistema centralizado de lubricación por neblina el cual atomiza aceite en pequeñas partículas y las dosifica en la cantidad correcta de lubricante nuevo, limpio y seco a los rodamientos, proporcionando una lubricación óptima que reduce la fricción. En las observaciones realizadas no se pudo apreciar contaminantes en los rodamientos de la bomba ni ensuciamiento de los mismos, ya que la lubricación por neblina reduce los niveles de contaminación del fluido. Se descarta este evento como causa de falla.

4.4.3.4 Recirculación en la succión

Los eventos considerados para la evaluación de esta sección fueron analizados en las secciones 4.4.1.1.3. para el evento “holgura inadecuada de anillos” y en la sección 4.4.1.2.2. para vibraciones.

4.5 Propuesta de mejoras al sistema de bombeo LPG G-2005 A/B basado en la metodología FMECA con el uso del Software XFMEA

Una vez definidas y analizadas las causas de las fallas del sistema con el uso del árbol de fallas, se determinaron los NPR usando las Tablas H.1, H.2 y H.3 presentadas en el Apéndice H, empleando la Ec. (3.8).



Se importó al software el documento de Microsoft Excel correspondiente, pudiendo de esta manera organizar la información, teniendo como resultado la ventana que se presenta en la Fig. 4.17.

Con la ayuda de la Tabla H.4 presentada en el apéndice H, se estableció el rango en el que se encuentran cada una de estas causas. Los resultados se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Clasificación de riesgo para las causas de fallas.

Causa de falla	NPR	Clasificación
Falla eléctrica	30	Bajo
Falta de lubricación de sello mecánico	80	Bajo
Corrosión	360	Moderado
Erosión	360	Moderado
Cristalización de LPG	576	Alto

A continuación se presentan las propuestas para disminuir las fallas en las bombas G-2005A/B:



Import from Excel

Function	Failure	Mission Phase/Operational Mode	Effect	Initial Severity	Cause	Initial Occurrence	Initial Detection	Initial RPN
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	No bombea LPG	atascamiento del impulsor	Se detiene el giro del impulsor y no se entrega energía al fluido de proceso	8	cristalización de LPG	9	8	576
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	No bombea LPG	Falla eléctrica	No hay transferencia de energía al fluido debido a que el motor se encue...	10	Falla eléctrica	3	1	30
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	Presión de descarga menor a 237 psig	Desgaste del impulsor	La bomba no entrega la presión requerida para bombear el reflujo hasta el tope del...	8	corrosion	9	5	360
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	Presión de descarga menor a 237 psig	Desgaste del sello mecánico	Ocasiona desgaste prematuro de las partes del sello y fugas	8	Falta de lubricación	2	5	80
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	Presión de descarga menor a 237 psig	Desgaste del sello mecánico	Escape de LPG a la atmósfera, baja presión de descarga	8	erosion	9	5	360
Bombear LPG desde el tambor de condensado D-2012 hasta el tope del debutanizador D-2011, como reflujo manteniendo una presión de 237 psig en la descarga y un caudal en el rango de 292-365 GPM	Caudal menor a 292 GPM	impulsor dañado	No fluye el caudal requerido	8	erosion	9	5	360

XFMEA

< Back Finish Cancel

Figura 4.17. Organización de las causas de fallas en el software Xfmea.



- **Cristalización y erosión**

El árbol de fallas describe que el LPG con el que trabajan las bombas se encuentra fuera de especificación, lo cual ocasiona que el producto se solidifique en las partes internas de las bombas; adicional a esto se encuentran compuestos de hierro en la corriente, originando que las partículas sean arrastradas y produzcan erosión de las partes.

Debido a la desviación en las propiedades del producto se recomienda realizar un análisis del producto (LPG) a fin de determinar que está afectando la reacción y la posterior solidificación del mismo, del mismo modo se recomienda realizar un mantenimiento adecuado a los filtros de las bombas con la finalidad de verificar el estado de los mismos y tomar las previsiones correspondientes.

- **Corrosión**

A pesar de que en los estudios realizados no se encontraron altas cantidades de componentes corrosivos, existe la posibilidad de que ocurra un ataque por corrosión en el sistema si no se toman las previsiones necesarias ya que el producto ha presentado anteriormente altos niveles de HCL, el cual es el agente corrosivo que atacaba a las bombas.

Es necesario anexar dispositivos que permitan regular o extraer el HCl producido en la reacción del catalizador o realizar mantenimiento a los existentes.

- **Falta de lubricación de sello mecánico**

El plan API 52 y el plan API 11 son los encargados de lubricar, enfriar y limpiar las caras de contacto del sello mecánico. La funcionalidad de estos



planes depende de las condiciones operacionales de las bombas y al presentar una desviación en éstas se producirá el mal funcionamiento de dichos planes.

Se propone realizar monitoreo al fluido de las bombas con el fin de detectar alguna desviación en las reacciones y de esta manera seleccionar un aceite barrera que cumpla con las condiciones actuales y así mitigar los daños en los sellos mecánicos.

- **Falla eléctrica**

Esta causa de falla corresponde a un evento externo a la planta de hidroprocesos, adicional a esto presento un NPR sumamente bajo, por lo cual no se presentan recomendaciones.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. El análisis del árbol de fallas permitió establecer que los eventos que causan las fallas son: cristalización del LPG, corrosión, erosión y falta de lubricación del sello mecánico; todos ellos ocasionados por variaciones en las propiedades del LPG, debido a la presencia de HCl en el sistema.
2. La tasa de fallas calculada para los equipos se considera representativa de las bombas pero inexacta ya que se poseían pocos datos en los informes de registro de fallas de las bombas.
3. Mediante el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) se logró identificar las fallas (No bombea LPG, presión de descarga menor a 237 psig y caudal menor a 292 GPM), modos de fallas (atascamiento del impulsor, fuga por sello mecánico, falla eléctrica y LPG fuera de especificación) y las consecuencias asociadas a cada falla funcional, permitiendo posteriormente la elaboración del Árbol de Fallas y la realización de la propuesta de mejoras para las bombas G-2005A/B.
4. El contexto operacional permitió confirmar que no se cumple estrictamente con el registro de datos de confiabilidad como lo establece la norma PDVSA MM01-01-03.
5. Con la descripción del contexto operacional se conoció que la función de las bombas G-2005 es impulsar LPG desde el tambor de condensado (D-2012), hasta la torre debutanizadora (D-2011),



manteniendo una presión de 237 psig y un caudal en el rango de 292-365 GPM.

5.2 Recomendaciones

1. Anexar dispositivos que permitan regular o extraer el HCl producido en la reacción del catalizador o realizar mantenimiento a los existentes.
2. Implementar estrategias que mejoren el registro de fallas de los equipos para garantizar la fidelidad de los parámetros de mantenimiento que se calculen.
3. Diseñar, implementar y supervisar planes de mantenimiento, basándose en el propósito de disminuir las fallas de los equipos
4. Aplicar las propuestas planteadas con la colaboración del personal de operaciones, mantenimiento, confiabilidad y servicio técnico de la planta de Reformación Catalítica.
5. Diseñar, implementar y supervisar un plan de monitoreo de vibraciones.
6. Monitorear el porcentaje de HCL en el LPG con la finalidad de tomar las precauciones necesarias en caso de que se encuentre en una concentración no aceptable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Boullon, J. **Evaluación técnica de las fallas recurrentes en las bombas de una unidad de recuperación de diluyente de un mejorador de crudo extrapesado.** Trabajo de Grado, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2005.
2. Pereira, R. **Identificación de las causas que producen fallas en las bombas de glicol pobre, pertenecientes al sistema de regeneración de la planta PIGAP II.** Trabajo de Grado, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2010.
3. Vivas, C. **Análisis de las causas de las fallas de los sellos mecánicos en un sistema de bombeo de crudo extrapesado.** Trabajo de Grado, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2011.
4. Mott, R. **Mecánica de los fluidos.** Editorial Pearson, Sexta edición, 2006.
5. Fernández, P. **Bombas centrífugas y volumétricas.** Guía teórica, Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria, Santander, España, 2004.



6. Bavaro, G. **Bombas centrífugas**. Primera edición, Caracas, Venezuela, 1992.
7. Suárez, D. **Curso de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC)**. Confima y Consultores, 2010.
8. Parra, C. **Metodologías de optimización de confiabilidad operacional**. PDVSA INTEVEP, 2002.
9. ABS Consulting. **Confiabilidad operacional**. Venezuela, Mayo 2006.
10. Mora, A. **Mantenimiento: planeación, ejecución y control**. Editorial Alfaomega, Primera Edición, 2009.
11. García, J. **Desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo**. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2011.
12. Bravo, L. **Fundamentos de mantenimiento de planta**. Guía teórico-práctica, Abril 2009.
13. Machiavelo, V. **Introducción a los análisis de árbol de falla (Fault Tree Analysis-FTA)**. Disponible en la página web: www.risksoftware.com.mx. 2010
14. Centro de recursos del departamento de Texas, división de compensación para trabajadores. **Análisis de fallas con diagramas de árbol**. Disponible en la página web: www.tdi.state.tx.us.(2010)



15. Hernández, M. **Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales**. Editorial FEDUPEL. Caracas, Venezuela 2006.

16. ReliaSoft. **Weibull 7++ Training Guide**. USA. 2011.

17. ReliaSoft. **Xfmea 5 Training Guide**. USA. 2011.

18. AspenTech. **Aspen Process Explorer**. USA. 2012.



APÉNDICE A. Ley numérica de Weibull

Tabla A.1. Ley numérica de Weibull para obtener A y B.

β	A	B	β	A	B	β	A	B
			1,5	0,9027	0,613	4,00	0,9064	0,254
			1,55	0,8994	0,693	4,10	0,9077	0,249
			1,6	0,8966	0,574	4,20	0,9089	0,244
			1,65	0,8942	0,556	4,30	0,9102	0,239
0,20	120	1901	1,70	0,8922	0,540	4,40	0,9114	0,235
0,25	24	199	1,75	0,8906	0,525	4,50	0,9126	0,230
0,30	9,2605	50,08	1,80	0,8893	0,511	4,60	0,9137	0,226
0,35	5,0291	19,98	1,85	0,8882	0,498	4,70	0,9149	0,222
0,40	3,3234	10,44	1,90	0,8874	0,486	4,80	0,9160	0,218
0,45	2,4786	6,46	1,95	0,8867	0,474	4,90	0,9171	0,214
0,50	2,00	4,47	2,00	0,8862	0,463	5,00	0,9182	0,210
0,55	1,7024	3,35	2,10	0,8857	0,443	5,10	0,9192	0,207
0,60	1,5046	2,65	2,20	0,8856	0,425	5,20	0,9202	0,203
0,65	1,3663	2,18	2,30	0,8859	0,409	5,30	0,9213	0,200
0,70	1,2638	1,85	2,40	0,8865	0,393	5,40	0,9222	0,197
0,75	1,1906	1,61	2,50	0,8873	0,380	5,50	0,9232	0,194
0,80	1,1330	1,43	2,60	0,8882	0,368	5,60	0,9241	0,191
0,85	1,0880	1,29	2,70	0,8893	0,355	5,70	0,9251	0,186
0,90	1,0522	1,77	2,80	0,8905	0,344	5,80	0,9260	0,185
0,95	1,0234	1,08	2,90	0,8917	0,334	5,90	0,9269	0,183
1,00	1,00	1,00	3,00	0,8930	0,325	6,00	0,9277	0,180
1,05	0,9803	0,934	3,10	0,8943	0,316	6,10	0,9286	0,177
1,10	0,9649	0,878	3,20	0,8957	0,331	6,20	0,9294	0,175
1,15	0,9517	0,83	3,30	0,8970	0,299	6,30	0,9302	0,172



1,20	0,9407	0,787
1,25	0,9314	0,75
1,30	0,9236	0,716
1,35	0,9170	0,687
1,40	0,9114	0,66
1,45	0,9067	0,635

3,40	0,8984	0,292
3,50	0,8997	0,285
3,60	0,9011	0,278
3,70	0,9025	0,272
3,80	0,9038	0,266
3,90	0,9051	0,260

6,40	0,9310	0,170
6,50	0,9318	0,168
6,60	0,9325	0,166
6,70	0,9333	0,163
6,80	0,9340	0,161
6,90	0,9347	0,160

— Valores de A y B para la bomba A

— Valores de A y B para la bomba B.

APÉNDICE B. Software Weibull++

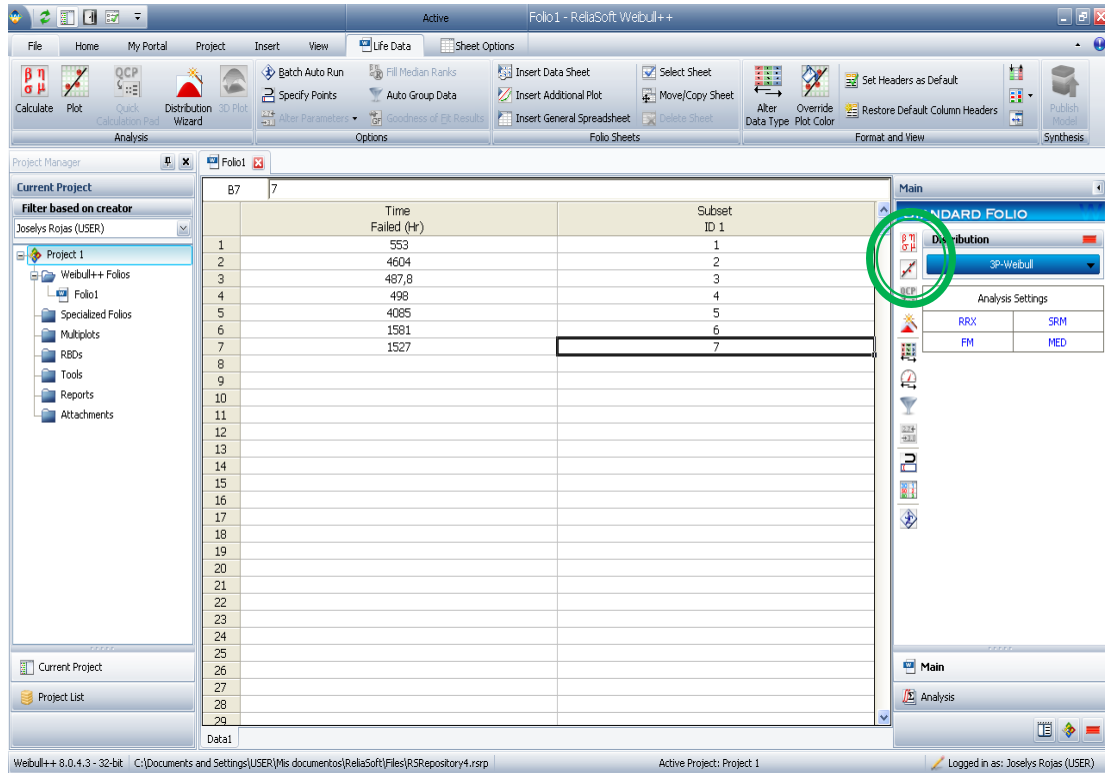


Figura B.1. Botones “calculate” y “plot” en el software Weibull++.



APÉNDICE D. Datos de operación de la bomba

Tabla D.1. Datos de operación de la bomba G-2005A.

Tiempos Bomba A (horas)					
	TO	TFS	TEF	Fecha de paro	Hora de paro
1	431	343	774	04/06/2010	03:00 p.m.
2	4239	122	4361	03/12/2010	08:00 a.m.
3	481,5	365	846,5	07/01/2011	02:30 p.m.
4	23	6,3	29,3	08/01/2011	06:00 p.m.
5	3870	475	4345	06/07/2011	07:00 p.m.
6	1436,7	215	1651,7	13/09/2011	03:30 p.m.
7	100	144,3	1194,3	02/11/2011	10:00 a.m.
8	2529	477	3006	06/03/2012	04:00 p.m.

Tabla D.2. Datos de operación de la bomba G-2005B.

Tiempos Bomba B (horas)					
	TO	TFS	TEF	Fecha de paro	Hora de paro
1	343	431	553	17/05/2010	04:00 p.m.
2	122	4239	4604	09/06/2010	05:00 p.m.
3	365	481,5	487,8	18/12/2010	01:00 p.m.
4	6,3	23	498	07/01/2011	07:00 p.m.
5	475	3870	4085	28/01/2011	01:00 p.m.
6	215	1436,7	1581	15/07/2011	06:00 p.m.
7	144,3	1050	1527	19/09/2011	04:00 p.m.
8	477	2529		22/11/2011	07:00 a.m.



APÉNDICE E. Cálculo de la tasa de fallas de la bomba G-2005B

E.1 Cálculo de la tasa de falla Bomba de LPG G-2005B

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.4.6 se procedió a calcular los parámetros del algoritmo de Weibull para el cálculo de la tasa de falla de la bomba G-2005B.

1. Se calculó la función de frecuencia acumulada $F_{(i)}$ mediante la ecuación 3.1. La tabla E.1 muestra los TEF en forma creciente, el numero ordinal “i” y la frecuencia acumulada de fallas.

Tabla E.1. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G-2005B.

Ordinal (i)	TEF	%F(i)
1	487,80	9,45
2	498,00	22,97
3	55,00	36,48
4	1527,00	50,00
5	1581,00	63,51
6	4085,00	77,02
7	4604,00	90,54

2. Una vez graficados los puntos presentados en la tabla E.1, se calculó el valor de Y_2 con la ecuación 3.3; el cual corresponde a t_2 en eje de las ordenadas. Se tomaron como puntos $A_1=498;22,973$ y $A_3=4085;77,027$ (ver Fig. E.1).



$$Y_2 = \frac{22,97 + 77,02}{2}$$

$$Y_2 = 49,995$$

3. Graficando Y_2 se tiene que $t_2 = 1500$ (ver figura E.1); sustituyendo en la Ec. 3.2 se tiene que:

$$\gamma = \frac{1500^2 - 498 \times 4085}{2 \times 1500 - 498 - 4085}$$

$$\gamma = -136,24$$

4. La data que resultó de la suma algebraica del parámetro γ a cada uno de los puntos se presenta en la Tabla E.2.

Tabla E.2. Tiempos entre falla y frecuencia acumulada de la bomba G-2005B restando el parámetro γ .

Ordinal (i)	TEF	%F(i)
1	351,56	9,45
2	361,76	22,97
3	416,76	36,48
4	1390,76	50,00
5	1444,76	63,51
6	3948,76	77,02
7	4467,76	90,54

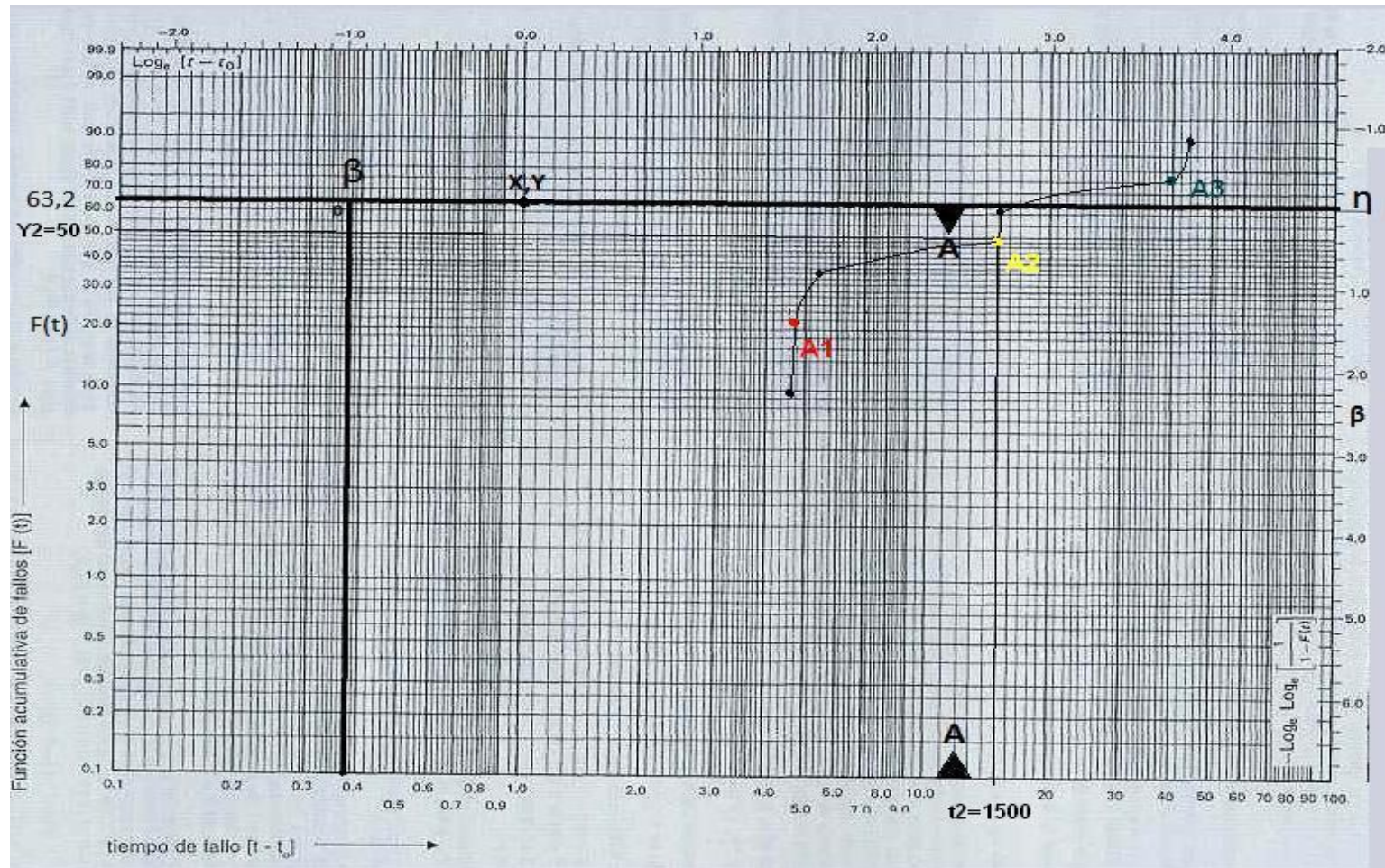


Figura E.1. Gráfica de Weibull para la bomba G-2005B



5. En la Figura E.1 se muestra la gráfica de los tiempos entre falla contra %F(i) en el papel de Weibull. De la gráfica se obtuvieron los valores de los parámetros de forma (β)= 1 y el parámetro de escala (η)=1850.
6. Con el valor de β se encontró el valor de A=1 y B=1 mostrados en el Apéndice "A".
7. Luego se determinó el TPEF_{data} y el TPEF_{Weibull} con las Ecs. 3.4 y 3.5 respectivamente.

$$TPEF_{DATA} = \frac{12382,120}{7} = 1768,874$$

$$TPEF_{WEIBULL} = 1 \times 1850 - 136,24 = 1713,76$$

8. Una vez determinados los tiempos promedios entre falla de Weibull y de la data se procedió a calcular el porcentaje de error mediante la Ec. 3.7.

$$\%ERROR = \left| \frac{1713,76 - 1768,874}{1713,76} \right| \times 100$$

$$\%ERROR = 3,215\% < 5\%$$

9. Se presenta la ecuación de tasa de falla.

$$\lambda = 5,405^{-4} \left(\frac{t+136,24}{1850} \right)^0 \quad E.1$$

Haciendo referencia al contexto operacional de las bombas donde se señala que la frecuencia de mantenimiento es trimestral, se calculó la tasa de fallas para 90 días (2160 horas) usando la Ec. E.1.



$$\lambda = 5,405E^{-4} \text{ fallas/horas}$$

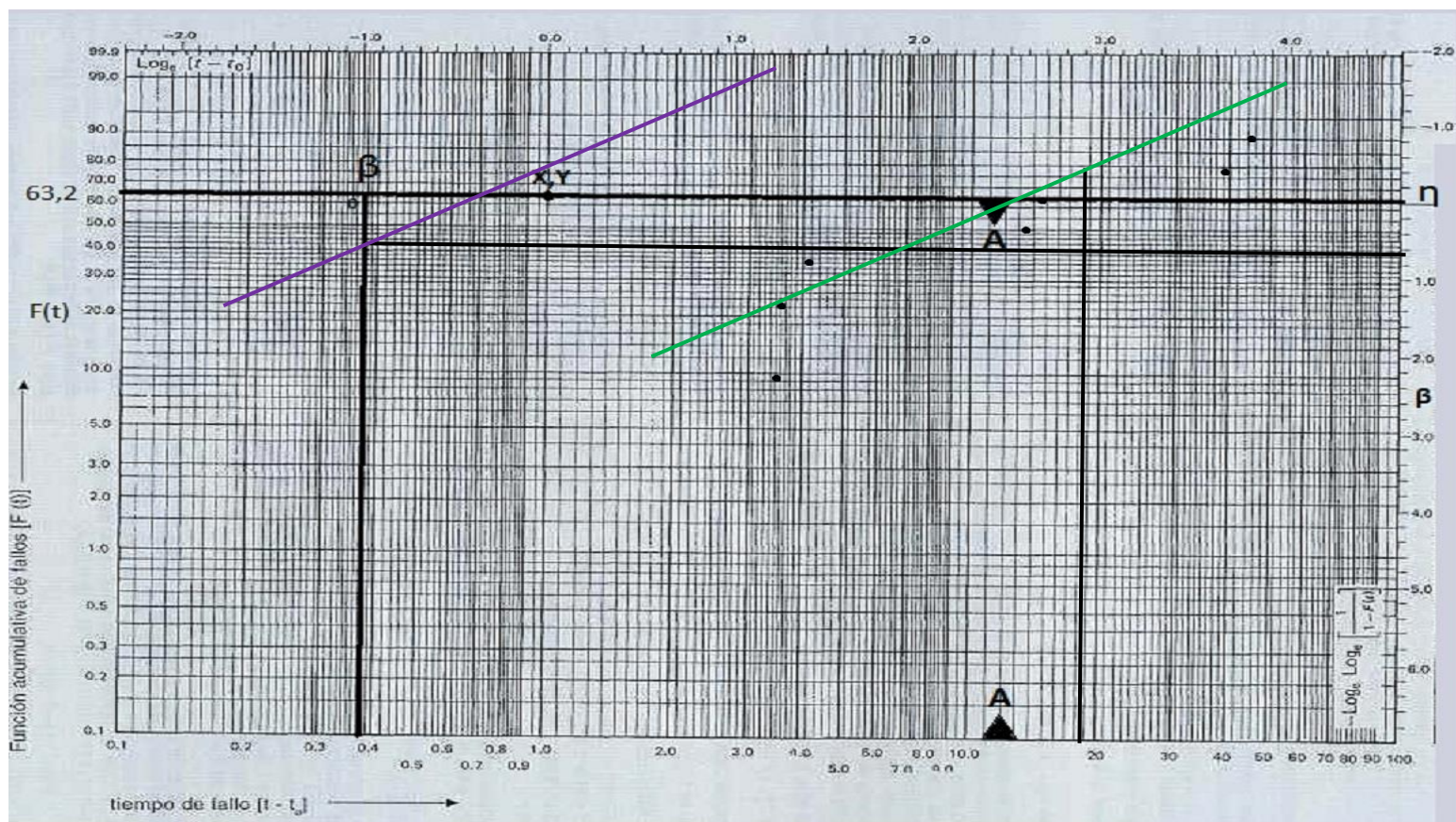


Figura E.2. Gráfica de Weibull con rectificación para la bomba G-2005B.

- Línea auxiliar, paralela a la tendencia.
- Línea de tendencia de la curva de Weibull.



APÉNDICE F. Plano del sello mecánico de la bomba G-2005a/b

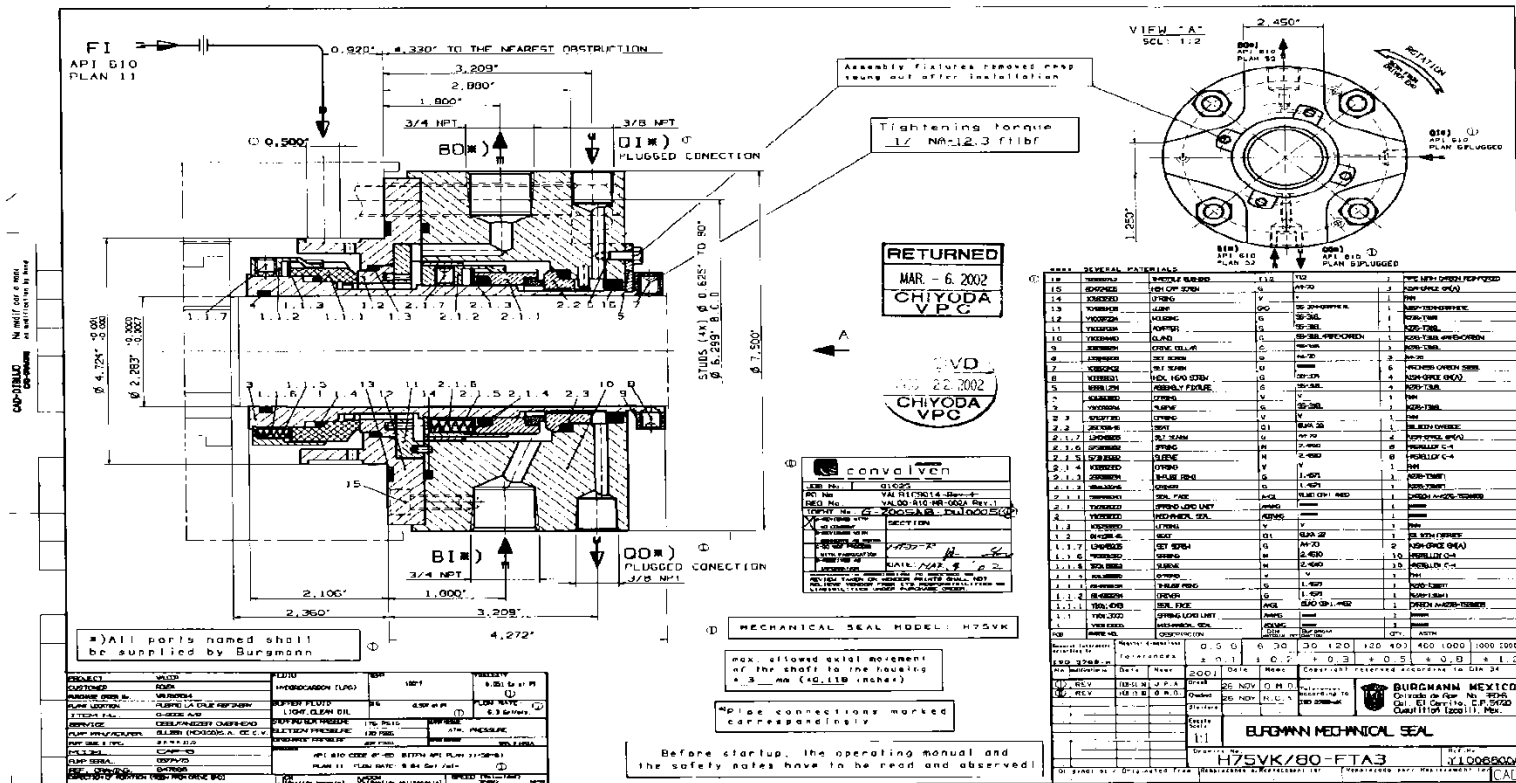


Figura F.1. Plano del sello mecánico de la bomba G-2005A/B.



APÉNDICE G. Norma ISO 10816-1 y espectros de vibración

Criterios generales de la banda de vibración de los grupos específicos de máquinas

ISO 10816-1 sustituye a la norma ISO 2372 como una guía general de medición y evaluación de las vibraciones mecánicas en maquinaria típica industrial. Nótese que aunque estas directrices se definen de acuerdo con la clasificación de la máquina como se indica más adelante, estas guías proporcionan un punto normalizado para la evaluación. Una vez que la clasificación general de la máquina ha sido identificada, la aplicación, técnica de montaje, y las condiciones operativas debe ser también factores en el nivel de aceptación en la aplicación de los criterios de evaluación. En las instalaciones específicas de la aplicación, esta guía puede ser modificada de acuerdo a requerimientos de aplicación.

Según la norma ISO 10816-1:

Las mediciones de velocidad se pueden clasificar de la siguiente manera:

Clase I: Las máquinas pueden separarse del conductor y conducido, o acoplados unidades que componen la maquinaria de funcionamiento de hasta aproximadamente 15kW (20 hp aproximadamente).

Clase II: Maquinaria (motores eléctricos de 15kW (20 hp) a 75kW (100 hp)), sin cimentaciones especiales, o montado de forma rígida; motores o máquinas hasta 300kW (400hp), montado sobre bases especiales.



Clase III: Máquinas grandes, motores primarios y otra maquinaria grande con grandes conjuntos giratorios montados sobre bases rígidas y pesadas, que son razonablemente duras en la dirección de la vibración.

Clase IV: Incluye grandes motores primarios y otra maquinaria grande con grandes conjuntos giratorios montados sobre bases que son relativamente suave en la dirección de la vibración medida (es decir, los generadores de turbina y turbinas de gas mayores de 10 MW (aprox. 13500hp) de salida).

Relacionando los límites típicos de la zona de frontera se describen de la siguiente manera:

Severidad de vibración		Límites de velocidad y clases de máquinas				
mm/s RSM	in/s Pico	Máquinas pequeñas Clase I	Máquinas medianas Clase II	Máquinas de gran tamaño		
				Soportes rígidos	Soportes menos rígidos	
0,28	0,02	Buena	Buena	Buena	Buena	
0,45	0,03					
0,71	0,04					
1,12	0,06	Satisfactoria	Satisfactoria	Satisfactoria	Buena	
1,80	0,10					
2,80	0,16	Insatisfactoria (alerta)	Insatisfactoria (alerta)	Satisfactoria	Satisfactoria	
4,50	0,25	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactoria (alerta)		
7,10	0,40			Insatisfactoria (alerta)	Insatisfactoria (alerta)	
11,20	0,62			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
18,00	1,00	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactoria (alerta)	
28,00	1,56				Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
45,00	2,51				Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)

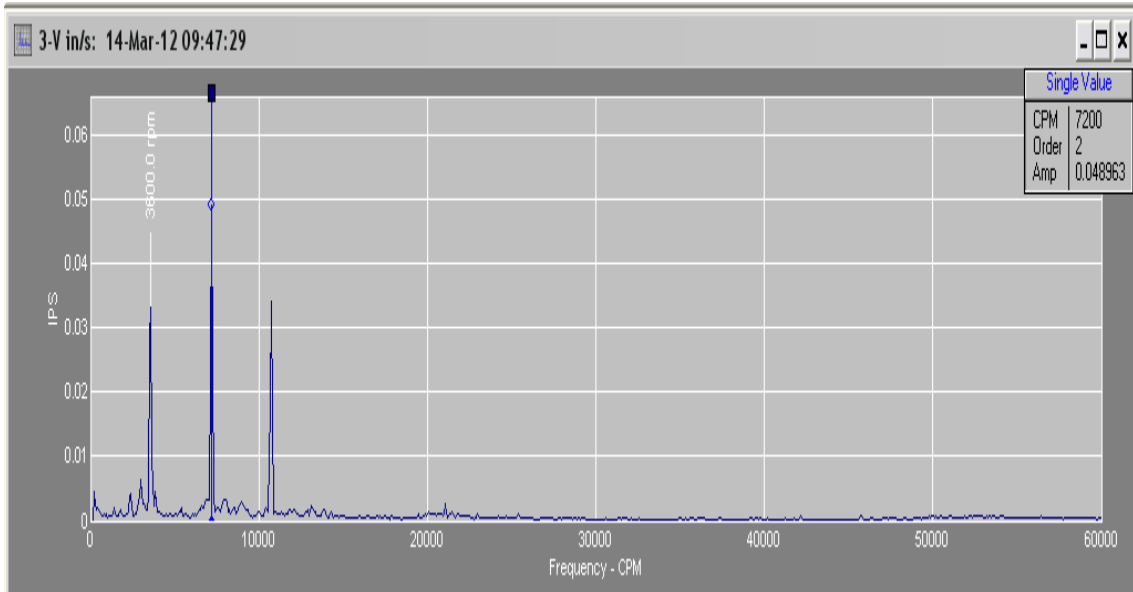


Figura G.1. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005A plano vertical).

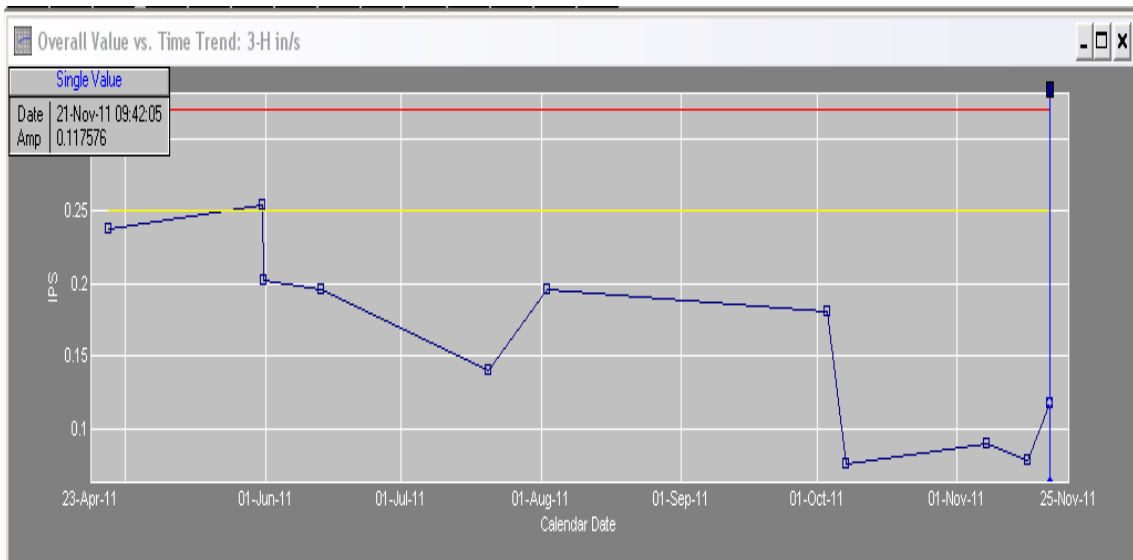


Figura G.2. Comportamiento "Overall Value" en función del tiempo de la bomba G-2005B.

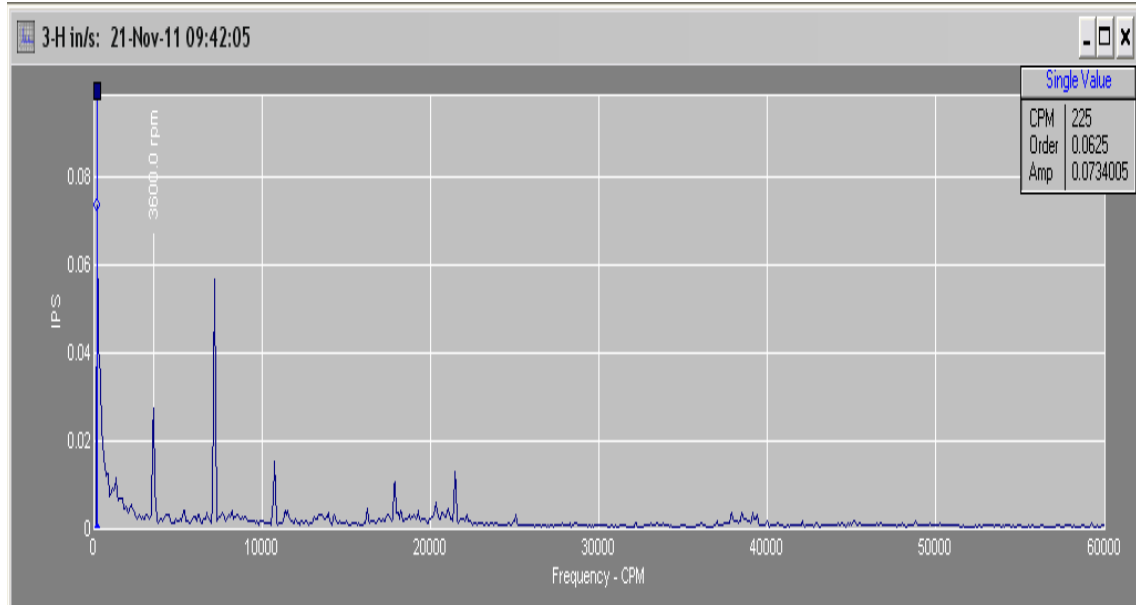


Figura G.3. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005B plano horizontal).

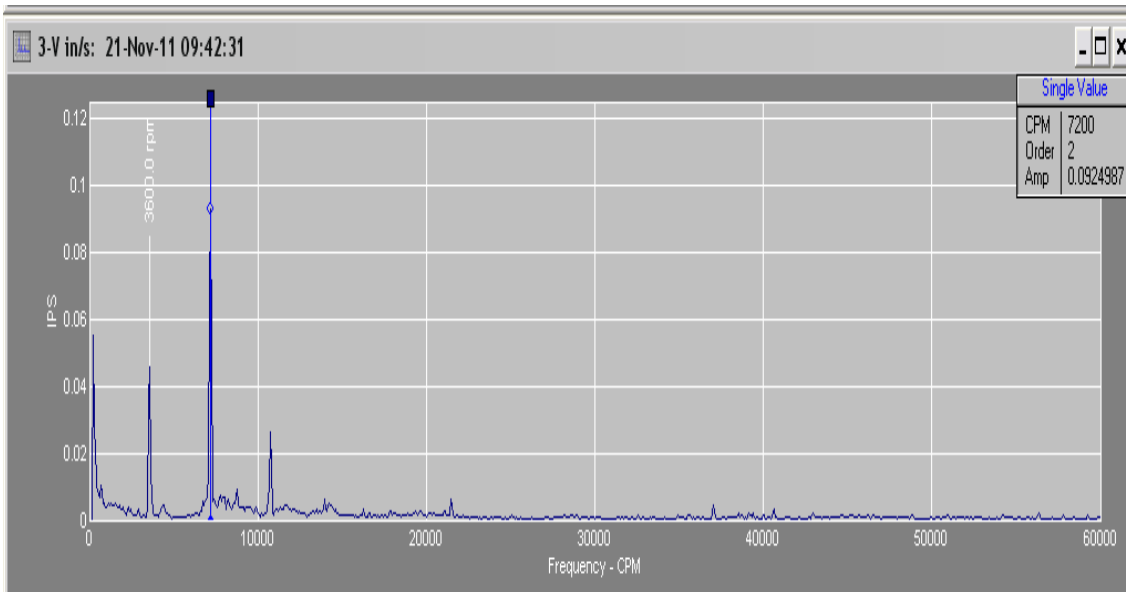


Figura G.4. Velocidad de vibración en función de la frecuencia (bomba G-2005B plano vertical).



APÉNCICE H. Escalas de severidad, ocurrencia y detección SAE J-1739

Tabla H.1. Escala de índice de severidad.

Fuente: Norma SAE J-1739

S	EFECTO	CRITERIO
1	Ninguno	Efecto identificado o perceptible.
2	Muy pequeño	Los elementos de ajuste, finalizados/rechinan y producen ruido no conforme. Defecto preciso evidenciado por los clientes (menos del 25%).
3	Menor	Los elementos de ajuste, finalizados/rechinan y producen ruido no conforme. Defecto demostrado por el 50% de los clientes.
4	Muy bajo	Los elementos de ajuste, finalizados/rechinan y producen ruido no conforme. Defecto notado por la mayoría de los clientes (más del 75%).
5	Bajo	Vehículo/producto operable, pero el tema(s) de la comodidad/conveniencia operativas(s) con un nivel de rendimiento reducido. Cliente algo insatisfecho.



6	Moderado	Vehículo/producto operable, pero el tema(s) de la comodidad/conveniencia operativas(s) inoperables. Cliente insatisfecho.
7	Alto	Vehículo / producto operable, pero con la reducción de los niveles de rendimiento. Cliente muy insatisfecho.
8	Muy alto	Vehículo / elemento inoperable (pérdida de las funciones primarias).
9	Peligroso con aviso previo	Índice de gravedad demasiado alto cuando el modo de falla potencial afecta la operación segura del producto y no implica el cumplimiento de las leyes gubernamentales con previo aviso.
10	Peligroso sin aviso previo	Índice de gravedad demasiado alto cuando el modo de falla potencial afecta la operación segura del producto y no implica el cumplimiento de las leyes gubernamentales sin previo aviso.



Tabla H.2. Escala de índice de ocurrencia.

Fuente: Norma SAE J-1739

O	PROBABILIDAD	Cpk
1	Remota. Falla improbable	igual a 1,67
2	Relativamente bajas. Pocas fallas	igual a 1,3
3		igual a 1,2
4	Moderadas. Fallas ocasionales	igual a 1,1
5		igual a 1
6		igual a 0,95
7	Alta. Fallas frecuentes	igual a 0,86
8		igual a 0,78
9	Muy alta. Fallas persistentes	igual a 0,55
10		<0,55

Tabla H.3. Escala de índice de detección.

Fuente: Norma SAE J-1739

D	DETECCION	CRITERIO
1	Casi seguro	El control de proyecto ciertamente detectara una causa/mecanismo potencial y subsecuente modo de fallo.
2	Muy alta	Posibilidad muy alta de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
3	Alta	Posibilidad alta de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.



4	Moderadamente alta	Posibilidad moderadamente alta de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
5	Moderada	Posibilidad moderada de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
6	Baja	Posibilidad baja de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
7	Muy baja	Posibilidad muy baja de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
8	Remota	Posibilidad remota de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
9	Muy remota	Posibilidad muy remota de que el control del proyecto detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla.
10	Casi imposible	El control del proyecto no detectara alguna causa/mecanismo potencial y posterior modo de falla ya que no existe el control del proyecto.

Tabla H.4. Clasificación de NPR.

Valor escala	1-135	136-500	501-1000
Valor logarítmico	0-0,32	0,32-0,70	0,71-1,00
Clasificación de riesgo	Pequeño	Moderado	Alto

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	"DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLAS DEL SISTEMA DE BOMBEO G-2005A/B DE LA UNIDAD DE REFORMACIÓN CATALÍTICA DE LA RPLC"
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Rojas B., Joselys Del V.	CVLAC: 19.611.400 E MAIL: joselysrojas@gmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**Bombas centrífugas****Reformación catalítica****Árbol de fallas****Fallas****Weibull**

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

El siguiente trabajo consistió en el estudio del sistema de bombeo G-2005A/B de la Unidad de Reformación Catalítica en la Planta de Hidroprocesos en la Refinería Puerto la Cruz, con la finalidad de determinar las causas de las fallas que presenta este sistema. Se recopiló información técnica de las bombas en relación a sus características y funcionamiento dentro del contexto operacional, se calculó la tasa de fallas para determinar la cantidad de averías que han presentado en un período de tiempo establecido; seguidamente se realizó un Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF), para identificar cuáles eran los modos de fallas y las consecuencias asociadas a éstos. Se analizaron las causas de las fallas mediante el Análisis de Árbol de fallas (FTA), determinándose como principales causas de fallas: cristalización de LPG, corrosión, erosión y lubricación inadecuada de sellos mecánicos. Con la ayuda del software Xfmea se organizó la información encontrada y a partir de esta se realizaron propuestas para disminuir las fallas en el sistema como: estudios químicos del LPG para la verificación de sus propiedades y de esta manera identificar la desviación, realizar mantenimiento o reemplazo de los dispositivos encargados de la extracción del HCl del sistema y monitoreo de las condiciones operacionales de las bombas con el fin de detectar desviaciones y de esta manera realizar acciones que permitan mitigar los daños en los sellos mecánicos.

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

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Rengel, José	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	9.278.475			
	E_MAIL	rengel66@gmail.com			
	E_MAIL				
Sotillo, Gerardo	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	12.274.223			
	E_MAIL	sotillo@pdvsa.com			
	E_MAIL				
Martínez, Johnny	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.340.871			
	E_MAIL	johnnymartinez@hotmail.com			
	E_MAIL				
González, Yordy	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	14.126.676			
	E_MAIL	yordygonzalez@hotmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DÍA
2013	02	20

LENGUAJE.SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Determinación de causas de fallas.doc	Application/msword

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

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (**OPCIONAL**)

TEMPORAL: _____ (**OPCIONAL**)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/Núcleo Anzoátegui

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

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo al Consejo Universitario para su aprobación”.



Joselys Del V. Rojas B.

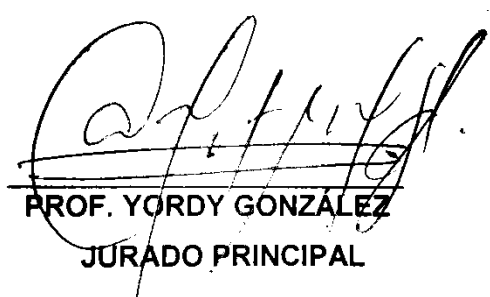
AUTOR



Prof. José E. Rengel
TUTOR



PROF. JOHNNY MARTÍNEZ
JURADO PRINCIPAL



PROF. YORDY GONZÁLEZ
JURADO PRINCIPAL



Prof. Delia Villarroel
SUBCOMISION DE TESIS
