

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE
MANTENIMIENTO QUE PERMITA ELABORAR
UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS
DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE GASES DE
PROYECTO NORMATIVO EN PLANTA DE
FUNDICIÓN DE COBRE SEGÚN APLICACIÓN
DEL DS 28/2013

MIGUEL ANGEL AGUIRRE PONCE

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: MG. ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PEDRO SARIEGO PASTÉN

NOVIEMBRE - 2018

Agradecimientos

A Anglo American, Fundición Chagres y a la Superintendencia de Mantenimiento, quienes me dieron la oportunidad de poder realizar este trabajo. Al Superintendente Ricardo Toledo, por recibirme y apoyar mi trabajo, a los departamentos de electricidad, instrumentación y mecánica, en especial a Cristóbal, por su disposición y colaboración; especialmente a Luis Ramírez, quien depositó todo su apoyo y confianza en mí. Al departamento de Mantención Predictiva y Taller Central, conformado por Alida, Diego, Luis, Pablo y Marcelo, quienes fueron una familia durante mi estadía.

También quiero agradecer a mis profesores, don René y don Pedro, que gracias a los conocimientos transmitidos y su guía, ayudaron a confeccionar este trabajo.

A Roberto, por ayudarme, guiarme y orientarme.

A Gustavo, quien gracias a su música, hicieron todas esas horas de escritura, más agradable.

“No sólo hubiésemos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy... ¡Gracias totales!”

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado especialmente a mis padres, María Rosa y Angel, quienes a través de su cariño, paciencia y amor incondicional, guiaron, educaron y permitieron que este momento se haya cumplido.

A mi familia, quienes siempre me han brindado su cariño y amor, en las distintas etapas de mi vida.

A Angel Custodio, mi ángel de la guarda y uno de mis pilares.

A los que partieron, pero que siempre recordaré.

A Dulce, mi fiel compañera.

Resumen

Las plantas de tratamiento de gases, son totalmente necesarias en una fundición de cobre. Son un conjunto de equipos que procesan los gases de los hornos de refinación y de los hornos de limpieza de escorias, con el objetivo de reducir las emisiones de material particulado y arsénico, principalmente, para permanecer dentro de los parámetros establecidos por el DS 28/2013.

Para entender la situación y la raíz de los problemas que afectan a las plantas, se comienza por conocer los equipos que la conforman, sus parámetros operacionales y los problemas regulares a los que se enfrentan.

Para ello, se clasifican a través de la metodología del análisis de criticidades, con la tarea de poder tipificarlos según su impacto en el proceso, en: salud, seguridad, medio ambiente y comunidad, dejando los de mayor relevancia para una evaluación detallada. Luego serán medidos según la metodología de análisis de modos de falla y efectos críticos, para poder dilucidar y anteponerse a los posibles modos de fallo que puedan presentar, catalogarlos según su nivel de severidad, ocurrencia, detección y clasificarlos en base a su nivel de riesgo.

En paralelo, se realiza el cálculo de confiabilidad del equipo, según los fallos indicados en la plataforma del sistema de información Ellipse, en el cual se consideró como fecha límite el día 09/10/2018, debido al comienzo de la mantención general en la Fundición Chagres.

Teniendo e identificando las características de las fechas de falla de los equipos, se procede a analizar en base a confiabilidad, mediante el uso de la distribución de Weibull, aplicando el método de los mínimos cuadrados, para así obtener los parámetros respectivos que permitan modelar y analizar la confiabilidad, conforme pasa el tiempo. En base a esto se determina una estrategia de mantenimiento preventivo, con el objetivo de optimizar las pautas de mantenimiento ya existentes, para complementarlas con los hitos arrojados por el análisis de modos de falla y efectos críticos (AMFEC), y que éstas a su vez no consideraban. Adicionalmente, se sugieren cambios, con el objetivo de ayudar y mejorar la estrategia.

Finalmente, queda pendiente para revisiones futuras el realizar nuevamente el AMFEC y los cálculos de confiabilidad, para cerciorarse y comprobar el efecto de las medidas correctivas propuestas.

Abstract

Gas treatment plants are totally necessary in a copper smelter. They are a set of equipment that processes the gases from refining furnaces and slag cleaning furnaces, with the objective of reducing the emissions of particulate and arsenic material, mainly to be within the established parameters for the DS 28/2013.

To understand the situation and the root of the problems related to the plants, is necessary to know the equipment involved, the operational parameters and the regular problems.

In order to this, the pieces of equipment are classified through the function of analysis of the critics, the task of being able to typify according to the impact in the process, in: health, safety, environment and community, leaving aside most of the relevant incidence.

Subsequently, they will be analyzed according to the methodology of analysis of failure modes and critical effects, and so elucidate and precede the possible failure modes that may occur.

Catalog them according to their level of severity, occurrence, detection and classify them based on their level of risk.

In parallel, the equipment reliability calculation is performed, according to the failures indicated in the platform of the Ellipse information system, which was considered as the deadline on 09/10/2018, due to the start of the general maintenance in the Chagres smelter.

Having and identifying the characteristics of the failure dates of the piece of equipment, we proceed to analyze based on reliability, by using the Weibull distribution, applying the least squares method, to obtain the respective parameters, which allows us to model and analyze the reliability, as time goes by. Based on this, a preventive maintenance strategy is determined, with the aim of optimizing existing maintenance guidelines, to complement them with the milestones thrown by the failure mode and effects and criticality analysis (FMECA), and which in turn were not considered. Additionally, some changes are suggested in order to help and improve the strategy.

Finally, it is pending for future reviews to carry out again the FMECA and the reliability calculations, to ascertain the effect of the proposed corrective measures.

Glosario

HSEC: Modelo de gestión integrado que involucra aspectos de Salud, Seguridad, Medio Ambiente y Comunidad (Health, Safety, Environmental, Community).

MMA: Ministerio de Medio Ambiente.

SMA: Superintendencia del Medio Ambiente.

OCDE: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.

MP: Material particulado.

MP 2,5: Material particulado en suspensión de dimensión 2,5 micrómetros.

MP 10: Material particulado en suspensión de dimensión 10 micrómetros.

SO₂: Dióxido de azufre / Anhídrido sulfuroso.

Cu: Cobre.

SiO₂: Dióxido de silicio.

As: Arsénico.

Hg: Mercurio.

Pb: Plomo.

Ni: Níquel.

Cd: Cadmio.

VTI: Ventilador de tiro inducido.

VDF: Variador de frecuencia.

PTG: Planta de tratamiento de gases.

HLE: Horno de limpieza de escoria.

HR: Horno de refinación.

CPS: Convertidor Pierce Smith.

PTG-HR's: Planta de tratamiento de gases de los hornos de refinación.

PTG-HLE's: Planta de tratamiento de gases de los hornos de limpieza de escoria.

Wesp: Precipitador electrostático húmedo (*Wet electrostatic precipitator*).

AMFEC: Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos.

Índice de contenidos

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Glosario.....	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de Ilustraciones.....	x
Índice de Tablas.....	xiii
I- Introducción.....	xviii
II- Objetivos y Alcance.....	xix
- Objetivo General.....	xix
- Objetivos Específicos.....	xix
III- Desarrollo del Trabajo.....	1
1. Capítulo I: Antecedentes Generales.....	1
1.1. La empresa.....	1
1.2. Organigrama de la empresa.....	2
1.3. Departamento de Mantenición.....	3
1.4. Productos elaborados por la empresa.....	4
1.5. Proceso productivo.....	4
1.5.1. Almacenamiento y secado de concentrado.	5
1.5.2. Fusión de concentrado:	5
1.5.3. Conversión.....	5
1.5.4. Refinación y moldeo.....	6
1.5.5. Limpieza de escoria.....	6
1.5.6. Manejo de gases y producción de escoria.....	6

1.5.7. Chancado de escoria.....	7
1.6. Clientes.	8
2. Capítulo II: Estudio de la situación actual.....	9
2.1. Situación actual.....	9
2.2. Contexto.....	10
2.2.1. Decreto Supremo 28/2013.....	10
2.2.1.1. Emisiones declaradas por las fundiciones en el año 2010.....	12
2.2.2. Prácticas operacionales para el control de emisiones.....	15
2.3. Contexto Aplicado.....	16
2.4. Proyecto Normativo Fundición Chagres.....	18
2.4.1. Planta de tratamiento de gases.....	19
2.4.1.1. Planta de tratamiento de gases de hornos de refinación.....	21
2.4.1.1.1. Área de manejo de gases de hornos de refinación.....	22
2.4.1.1.2. Área de tratamiento de gases de hornos de refinación.....	23
2.4.1.2. Planta de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria.....	26
2.4.1.2.1. Área de manejo de gases de hornos de limpieza de escoria.....	27
2.4.1.2.2. Área de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria...28	
2.4.1.3. Suministro de Agua de Procesos y Agua de Emergencia.....	31
2.4.1.3.1. Circuito de suministro de agua de procesos.....	31
2.4.1.3.2. Circuito suministro de agua de emergencia.....	31
2.4.2. Planta separación sólido/líquido.....	32
2.4.2.1. Etapa de clarificación de agua.....	32
2.4.2.2. Etapa de filtración de lodos.....	33
2.4.3. Secador de concentrado, secador Kumera.....	33
2.4.3.1. Área secador a vapor.....	34
2.4.3.2. Área manejo de vahos.....	34
2.4.3.3. Área manejo de condensados.....	34
2.4.3.4. Área sistema de transporte neumático.....	34
3. Capítulo III: Estado del arte.....	35
3.1. Mantenimiento.....	35
3.1.1. El concepto de mantenimiento.....	35

3.1.2. Evolución del mantenimiento.....	35
3.1.3. Estrategias de mantenimiento.....	36
3.1.3.1. Correctivas.....	36
3.1.3.2. Preventivas.....	37
3.1.3.3. Predictivas.....	37
3.2. Análisis de Criticidad.....	37
3.2.1. Descripción de la metodología de análisis de criticidad.....	37
3.2.2. Secuencia del análisis de criticidad.....	38
3.3. Metodología AMFEC.....	40
3.3.1. Componente, Subsistema o Proceso.....	41
3.3.2. Función.....	42
3.3.3. Falla Funcional.....	42
3.3.4. Modo de la Falla.....	42
3.3.5. Efecto de la Falla.....	42
3.3.6. Severidad.....	43
3.3.7. Causa de la Falla.....	43
3.3.8. Ocurrencia.....	44
3.3.9. Controles Actuales.....	45
3.3.10. Detección.....	45
3.3.11. Responsabilidad.....	46
3.3.12. NPR.....	46
3.4. Teoría de la confiabilidad.....	47
3.4.1. Conceptos de la confiabilidad.....	47
3.4.2. Distribución de Weibull.....	50
3.4.2.1. Determinación de los parámetros de Weibull.....	51
3.4.2.2. Aplicación del método.....	53
4. Capítulo IV: Desarrollo de la estrategia.....	54
4.1. Listado de equipo.....	54
4.2. Listado de equipos y criticidad asociada.....	56
4.3. Confiabilidad de los equipos críticos B.....	58
4.3.1. Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación (Wesp).....	59

4.3.1.1. Medidas correctivas.....	62
4.3.2. Precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria (Wesp 1).....	63
4.3.2.1. Medidas correctivas.....	66
4.3.3. Precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria (Wesp 2).....	67
4.3.3.1. Medidas correctivas.....	70
4.3.4. Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	71
4.3.4.1. Medidas correctivas.....	74
4.3.5. Ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.....	75
4.3.5.1. Medidas correctivas.....	78
4.3.6. Bomba flushing de hornos de refinación.....	79
4.3.6.1. Medidas correctivas.....	82
4.3.7. Bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	83
4.3.7.1. Medidas correctivas.....	86
5. Conclusiones.....	87
6. Referencias.....	89
Anexo A: Matriz de criticidad.....	91
Anexo B: Análisis de Modo de Fallas y Efectos Críticos de los equipos evaluados.....	94
Anexo C: Registro de falla de los equipos.....	114
Anexo D: Resultados para calcular parámetros de Weibull.....	117
Anexo E: Datos Técnicos de equipos evaluados.....	121
Anexo F: Equipos críticos de la planta de separación sólido / líquido.....	128
Anexo G: Contingencia en Operación de las Plantas de tratamiento de Gases HR – HLE y Planta de Separación Sólido / Líquido.....	165

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1: Operaciones de Anglo American PLC en el mundo.....	1
Ilustración 1.2: Ubicación de fundición Chagres en la Región de Valparaíso.....	2
Ilustración 1.3: Gobierno corporativo de Fundición Chagres.....	2
Ilustración 1.4: Organigrama Departamento de Mantenición.....	3
Ilustración 1.5: Organigrama Departamento de Mantenición Predictiva y Taller Central.....	3
Ilustración 1.6: Esquema General del Proceso Productivo de Fundición Chagres.....	7
Ilustración 2.1: Ubicación geográfica de Fundición Chagres.....	8
Ilustración 2.2: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo del aire.....	9
Ilustración 2.3: Vista aérea Fundición Chagres.....	19
Ilustración 2.4: Diagrama de las PTG HR's y PTG HLE's.....	20
Ilustración 2.5: Esquema del circuito de gases desde hornos de refinación hasta chimenea.....	23
Ilustración 2.6: Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación (Wesp).....	24
Ilustración 2.7: Esquema del precipitador electrostático húmedo y bombas asociadas.....	25
Ilustración 2.8: Esquema del circuito de gases desde hornos de limpieza de escoria hasta chimenea.....	28
Ilustración 2.9: Precipitador electrostático húmedo N°1 y N°2 de hornos de limpieza de escoria.....	29
Ilustración 2.10: Esquema de Wesp1 y Wesp2 con bombas asociadas.....	30
Ilustración 2.11: Esquema circuito de agua de reposición y emergencia.....	32
Ilustración 3.1: Evolución del mantenimiento.....	36
Ilustración 3.2: Esquema de conformación de AMFEC.....	41
Ilustración 3.3: Representación de la función de densidad de falla.....	48
Ilustración 3.4: Tasa de falla o Curva de la bañera.....	49
Ilustración 4.1: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en Wesp.....	60
Ilustración 4.2: Tasa de falla vs tiempo en Wesp.....	61
Ilustración 4.3: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de Wesp 1.....	64
Ilustración 4.4: Tasa de falla vs tiempo de Wesp 1.....	65

Ilustración 4.5: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en Wesp 2.....	68
Ilustración 4.6: Tasa de falla vs tiempo en Wesp 2.....	69
Ilustración 4.7: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación.....	72
Ilustración 4.8: Tasa de falla vs tiempo de Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	73
Ilustración 4.9: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.....	76
Ilustración 4.10: Tasa de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.....	77
Ilustración 4.11: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de bomba flushing hornos de refinación.....	80
Ilustración 4.12: Tasa de falla vs tiempo de bomba flushing de hornos de refinación.....	81
Ilustración 4.13: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de bomba flushing hornos de limpieza de escoria.....	84
Ilustración 4.14: Tasa de falla vs tiempo de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	85
Ilustración E.1: Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.....	122
Ilustración E.2: Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	124
Ilustración E.3: Bomba flushing de hornos de refinación.....	126
Ilustración F.1: Filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	130
Ilustración F.2: Filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	132
Ilustración F.3: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de refinación.....	146
Ilustración F.4: Tasa de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de refinación.....	147
Ilustración F.5: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	150
Ilustración F.6: Tasa de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	151
Ilustración F.7: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro prensa automático de hornos de refinación.....	154

Ilustración F.8: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático de hornos de refinación.....	155
Ilustración F.9: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	158
Ilustración F.10: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	159
Ilustración F.11: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.....	162
Ilustración F.12: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.....	163
Ilustración G.1: de acoplamiento del tren de gases HR's a PTG HLE's.....	167

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Características de ánodos según Clientes.....	8
Tabla 2.1: Condiciones ambientales y geográficas de la ubicación de Fundición Chagres.....	9
Tabla 2.2: Elementos contaminantes y efectos en la salud.....	11
Tabla 2.3: Emisiones de SO ₂ de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.....	12
Tabla 2.4: Emisiones de As de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.....	13
Tabla 2.5: Emisiones de MP de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.....	13
Tabla 2.6: Emisiones de Hg de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.....	14
Tabla 2.7: Límites establecidos para para plantas existentes y nuevas, según DS 28/2013.....	14
Tabla 2.8: Emisiones de SO ₂ y As permisibles para las Fundiciones en Chile con la nueva normativa.....	15
Tabla 2.9: Fecha límite para entrada en vigencia según la normativa del DS28/2013.....	16
Tabla 2.10: Límites establecidos y plazos para Fundición Chagres.....	17
Tabla 2.11: Parámetros que Fundición Chagres cumplía hasta la promulgación del DS 28/13.....	18
Tabla 2.12: Dimensiones de los hornos de refinación.....	21
Tabla 2.13: Combinaciones operacionales posibles en hornos de refinación.....	21
Tabla 2.14 Gases a tratamiento y tratados promedios en hornos de refinación.....	22
Tabla 2.15: Dimensiones de los hornos de limpieza de escoria.....	26
Tabla 2.16: Gases a tratamiento y tratados promedios en hornos de limpieza de escoria.....	27
Tabla 3.1: Matriz de criticidad simplificada.....	38
Tabla 3.2: Categoría y nivel de riesgo de la matriz.....	38
Tabla 3.3: Probabilidad de falla de la matriz.....	39
Tabla 3.4: Consecuencias y tipo de pérdidas de la matriz.....	39
Tabla 3.5: Criterios y puntuaciones para la severidad del efecto de la falla.....	43
Tabla 3.6: Criterios y categorías de ocurrencia.....	44
Tabla 3.7: Criterios y categoría de detección.....	45
Tabla 3.8: Línea directriz para NPR.....	46

Tabla 4.1: Tag de los equipos en planta de tratamiento de gases de hornos de refinación.....	54
Tabla 4.2: Tag de los equipos en planta de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria.....	55
Tabla 4.3: Tag de los equipos en suministro de agua de proceso y agua de emergencia.....	55
Tabla 4.4: Equipos PTG-HR con criticidad asociada.....	56
Tabla 4.5: Equipos PTG-HLE con criticidad asociada.....	56
Tabla 4.6: Tabla de equipos de suministro de agua de procesos y agua de emergencia con criticidad asociada.....	57
Tabla 4.7: Parámetros de Weibull de Wesp.....	59
Tabla 4.8: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla en Wesp respecto al tiempo.....	59
Tabla 4.9: Parámetros de Weibull de Wesp 1.....	63
Tabla 4.10: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de Wesp 1 respecto al tiempo.....	63
Tabla 4.11: Parámetros de Weibull de Wesp 2.....	67
Tabla 4.12: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de Wesp 2 respecto al tiempo.....	67
Tabla 4.13: Parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación.....	71
Tabla 4.14: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación respecto al tiempo.....	71
Tabla 4.15: Parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.....	75
Tabla 4.16: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria respecto al tiempo.....	75
Tabla 4.17: Parámetros de Weibull de bomba flushing de horno de refinación.....	79
Tabla 4.18: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de bomba flushing de hornos de refinación respecto al tiempo.....	79
Tabla 4.19: Parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	83
Tabla 4.20: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria respecto al tiempo.....	83

Tabla A.1: Matriz de criticidad.....	92
Tabla A.2: Tabla de probabilidad aplicada en matriz de criticidad.....	93
Tabla A.3: Tabla de categoría y riesgo aplicada en matriz de criticidad.....	93
Tabla B.1: AMFEC de precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.....	95
Tabla B.2: AMFEC de precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	99
Tabla B.3: AMFEC de precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.....	103
Tabla B.4: AMFEC de ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	106
Tabla B.5: AMFEC de ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.....	108
Tabla B.6: AMFEC de bomba flushing de hornos de refinación.....	110
Tabla B.7: AMFEC de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	112
Tabla C.1: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.....	115
Tabla C.2: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	115
Tabla C.3: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.....	115
Tabla C.4: Registro de fallos en ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	116
Tabla C.5: Registro de fallos en ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.....	116
Tabla C.6: Registro de fallos en bomba flushing de hornos de refinación.....	116
Tabla C.7: Registro de fallos en bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	116
Tabla D.1: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.....	118
Tabla D.2: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	118
Tabla D.3: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.....	118
Tabla D.4: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.....	119
Tabla D.5: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.....	119
Tabla D.6: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de refinación.....	119
Tabla D.7: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.....	120

Tabla E.1: Datos técnicos precipitador Wesp, Wesp 1 y Wesp 2.....	122
Tabla E.2: Datos de diseño de precipitador Wesp y Wesp 1.....	123
Tabla E.3: Características de ventiladores de tiro inducido hornos de refinación y limpieza de escoria.....	124
Tabla E.4: Composición de los gases transportados.....	125
Tabla E.5: Datos técnicos de bombas flushing de hornos de refinación y limpieza de escoria.....	126
Tabla F.1: Tag de los equipos en planta de separación sólido/líquido de hornos de refinación.....	129
Tabla F.2: Tag de los equipos en planta de separación sólido/líquido de hornos de limpieza de escoria.....	129
Tabla F.3: Lista de los equipos y criticidad asociada de planta de separación sólido/líquido de hornos de refinación.....	129
Tabla F.4: Lista de los equipos y criticidad asociada de planta de separación sólido/líquido de hornos de limpieza de escoria.....	129
Tabla F.5: Datos técnicos del filtro separador lamella.....	131
Tabla F.6: Datos de procesos del filtro separador lamella.....	131
Tabla F.7: Datos técnicos de equipo filtro prensa automático.....	133
Tabla F.8: AMFEC de filtro separador lamella de hornos de refinación.....	135
Tabla F.9: AMFEC de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	137
Tabla F.10: AMFEC de filtro prensa automático de hornos de refinación.....	139
Tabla F.11: AMFEC de filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria.....	141
Tabla F.12: Registro de falla en filtro separador lamella de hornos de refinación.....	143
Tabla F.13: Registro de falla en filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	143
Tabla F.14: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de refinación.....	144
Tabla F.15: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°1.....	144
Tabla F.16: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°2.....	144
Tabla F.17: Parámetros de Weibull de filtro separador lamella de hornos de refinación.....	145
Tabla F.18: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro separador lamella de hornos de refinación.....	145

Tabla F.19: Parámetros de Weibull de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	149
Tabla F.20: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.....	149
Tabla F.21: Parámetros de Weibull de filtro prensa automático de hornos de refinación.....	153
Tabla F.22: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático de hornos de refinación.....	153
Tabla F.23: Parámetros de Weibull en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	157
Tabla F.24: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.....	157
Tabla F.25: Parámetros de Weibull en filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.....	161
Tabla F.26: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.....	161

I. Introducción

Fundición Chagres, es la única fundición de cobre que posee Anglo American Chile en el país. Al mismo tiempo, es una de las 7 fundiciones existentes en el país.

Las fundiciones de cobre, por su naturaleza, están sujetas a generar una gran cantidad de subproductos, que son dañinos a la salud de las personas y al medioambiente, por lo que su control es de vital importancia, sobre todo en la actualidad, donde el tema medioambiental juega un papel crucial en normativas y legislaciones del país.

Con la promulgación y la entrada en vigencia del Decreto Supremo 28/2013, Anglo American División Fundición Chagres tuvo que desarrollar un proyecto, denominado “Proyecto Normativo Fundición Chagres”, el cual permite cumplir con las restricciones que impone el decreto sobre las emisiones de SO₂, material particulado y Arsénico, principalmente.

Dicho proyecto consiste en una serie de equipos agrupados en 3 grandes áreas:: planta de tratamiento de gases de los hornos de refinación, planta de tratamiento de gases de los hornos de limpieza de escoria y secado de concentrado.

El objetivo de este trabajo es definir una estrategia de mantenimiento, que permita a su vez, elaborar un plan de mantenimiento de las plantas de tratamientos de gases, de los hornos de refinación y de la limpieza de escoria.

Conforme se avanza en el presente escrito, se irá mostrando el proceso de evaluación a la cual fueron sometidos los equipos de las plantas, para ser catalogados en base a su criticidad, análisis de modos de falla y confiabilidad que presentan en la actualidad. Tales datos servirán para el desarrollo de la estrategia, con el fin de potenciar las falencias encontradas en el mantenimiento actual.

II. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una Estrategia de Mantenimiento que permita Elaborar un Plan optimizado mantenimiento de equipos de la planta de tratamiento de gases de los procesos de los hornos limpieza de escoria y hornos de refino de proyecto normativo en planta de fundición de Cobre.

Objetivos Específicos

- Contextualizar la importancia que tienen los procesos de mantención, para una fuente de emisión normada.
- Identificar el riesgo potencial del fallo de equipos respecto a producción, salud, seguridad, medio ambiente y comunidad (HSEC).
- Analizar los datos entregados en la inspección de los equipos.
- Evaluar el estado de los equipos en base a los patrones establecidos dentro de un rango de funcionamiento.
- Jerarquizar los equipos y las tareas de acuerdo al grado de riesgo asociado dentro del proyecto.
- Desarrollar y entregar un documento que contenga la estrategia de mantenimiento con las respectivas actividades para prevenir fallas.

III. Desarrollo del trabajo

Capítulo I: Antecedentes generales

1.1. La Empresa:

Anglo American PLC es uno de los grupos mineros más grandes del mundo, y se encuentra en una gran cantidad de países ver Ilustración 1.1. Siendo, Anglo American Chile, una división de este grupo.

En Chile, se centra mayoritariamente en la producción de concentrado de cobre y ánodos de cobre, también dirige sus actividades a la producción de concentrado de molibdeno y ácido sulfúrico.



Ilustración 1.1: Operaciones de Anglo American PLC en el mundo.

Anglo American División Fundición Chagres es la única fundición de cobre que posee Anglo American en Chile. Se encuentra ubicada en la V Región, en el Valle del Aconcagua comuna de Catemu, a 100 kilómetros al norte de Santiago y a 400 metros sobre el nivel del mar. En dicha zona, posee una superficie industrial de aproximadamente de 40 hectáreas.

Se encuentra ubicada en el denominado “distrito minero” de la zona central (ver Ilustración 1.2), el cual alberga las mayores reservas de cobre. Ubicado en una zona estratégica ya que se encuentra cerca de los 3 principales puertos de la zona centro y cerca de las 2 minas con mayores reservas de cobre. Además, la línea del tren que une dichas minas con los puertos mencionados anteriormente, pasa por Fundición Chagres.

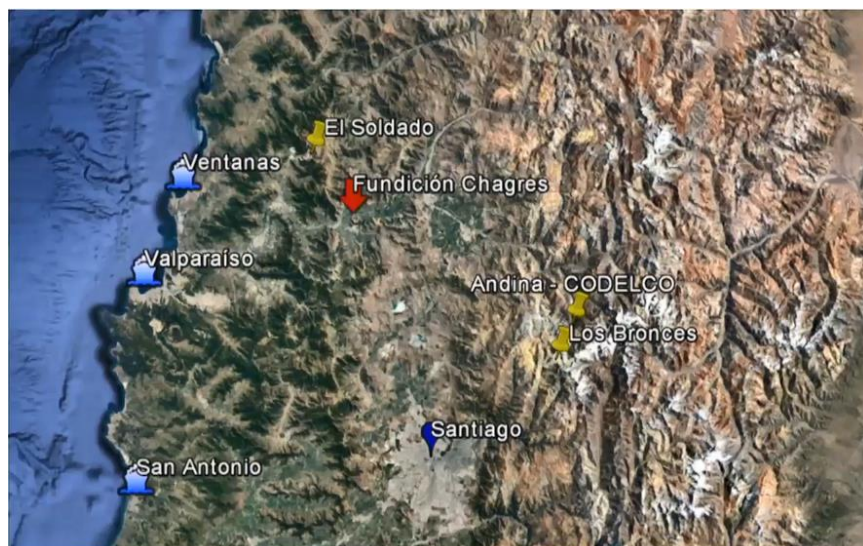


Ilustración 1.2: Ubicación de fundición Chagres en la Región de Valparaíso.

Posee una dotación de 509 personas, de las cuales, 350 son personal propio y 159 son contratistas.

1.2. Organigrama de la empresa

Fundición Chagres tiene una estructura jerárquica que está reflejada en la Ilustración 1.3

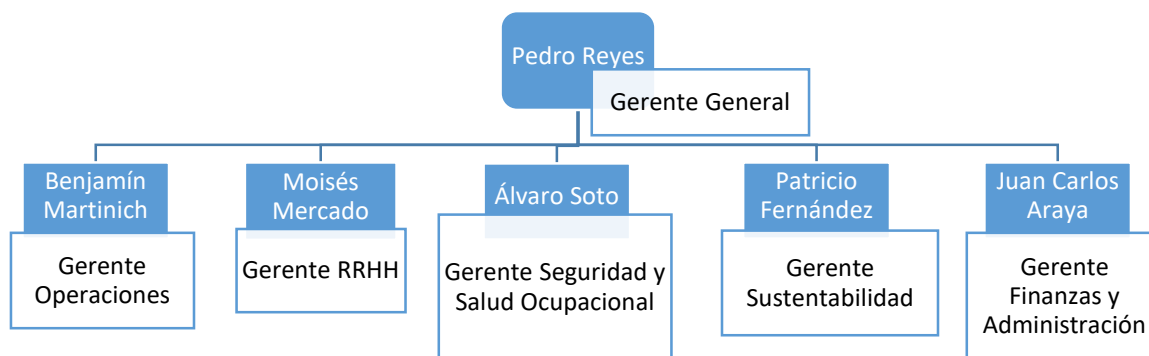


Ilustración 1.3: Gobierno corporativo de Fundición Chagres.

1.3. Departamento de Mantenición

El Departamento de Mantenición nace de la Gerencia de Operaciones. Este departamento, a cargo de la Superintendencia de Mantenición, tiene a cargo las jefaturas correspondientes a cada área del mantenimiento, reflejadas en la Ilustración 1.4.

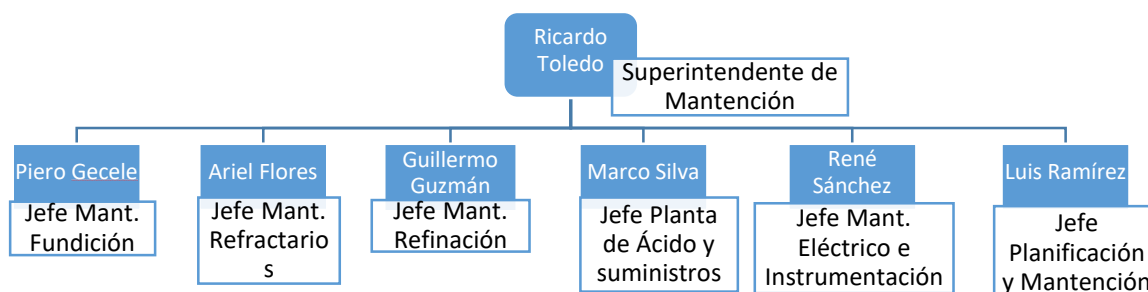


Ilustración 1.4: Organigrama Departamento de Mantenición.

Dentro de la jefatura de Planificación y Mantenición, está el Departamento de Mantenición Predictiva cuya estructura se puede ver en la Ilustración 1.5.

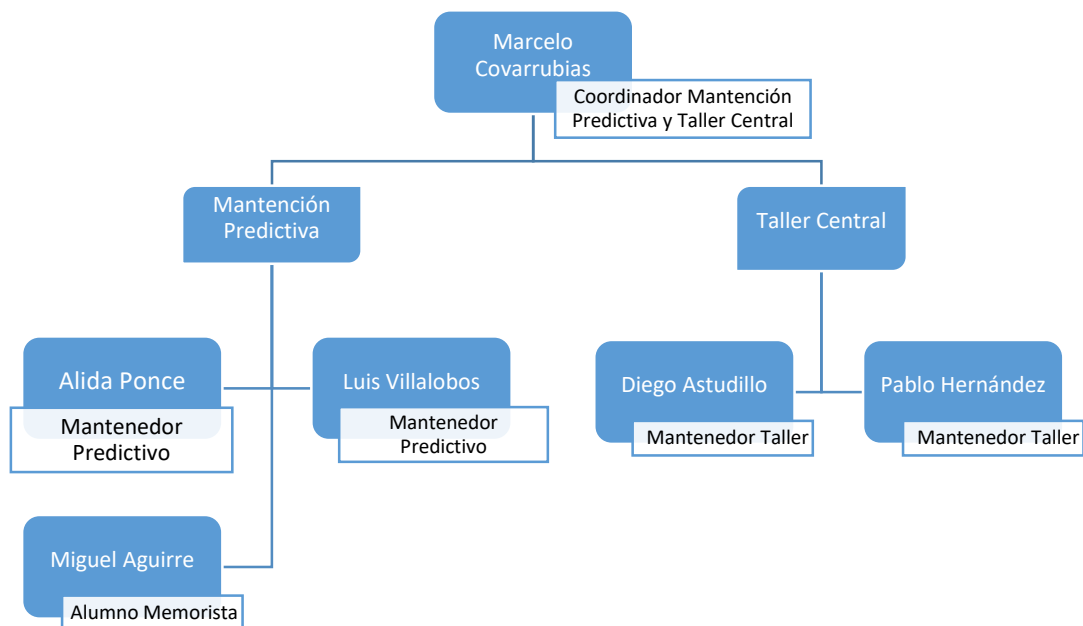


Ilustración 1.5: Organigrama Departamento de Mantenición Predictiva y Taller Central.

1.4. Productos Elaborados por la empresa

Los productos elaborados por Fundición Chagres son:

- Ánodos de Cobre: Cobre con un 99,6% en grado de pureza.
- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4): Ácido sulfúrico de grado A (98% de pureza).

1.5. Proceso Productivo

La Fundición Chagres, recibe el concentrado de cobre proveniente de distintas operaciones mineras, tales como: División El Soldado y Los Bronces, que a su vez son pertenecientes a la misma compañía.

Las Características principales de los concentrados son:

- El material proveniente de Los Bronces tiene un alto porcentaje de Cu, alcanzando un valor cercano de 30% y el SiO_2 con niveles que bordean el 2% al 3%.
- El mineral obtenido de la mina El Soldado contiene un rango entre 15-20% de Cu, pero con alto nivel de SiO_2 , cercano al 25%.

De este proceso surgen productos como ánodos de cobre con una capacidad que varía entre 400 y 450 [Ton/día], con una pureza de 99,6% y ácido sulfúrico (calidad A), que es generado a través de la captura de emisiones de anhídrido sulfuroso, produciendo aproximadamente un total de 1.500 [Ton/día].

En Resumen, las principales etapas del proceso productivo de la Fundición Chagres son:

- Almacenamiento y secado de concentrados.
- Fusión de concentrados.
- Conversión.
- Refinación y moldeo.
- Limpieza de escorias.
- Manejo de gases y producción de ácido.
- Chancado de escorias.

1.5.1. Almacenamiento y Secado de concentrado

El concentrado que ingresa a Fundición Chagres es almacenado en un edificio de acopio en donde es dispuesto en tolvas, allí se dosifica con sílice (usada para la formación de escoria), y posteriormente es transportado mediante un sistema de correas al área de secado, en donde se reduce el porcentaje de humedad de 11% a 0,2% aproximadamente, cuya fuente de calor es el vapor producido en el proceso de enfriamiento de gases de fusión. Finalmente, el concentrado seco es almacenado en una tolva, encargada de alimentar al Horno Flash.

1.5.2. Fusión de concentrado

La fusión del concentrado seco es realizada mediante la incorporación del concentrado seco por medio de la torre de reacción del Horno Flash, el cual posee una tasa promedio de 78 [Ton/h]. La tecnología permite fundir el concentrado por medio de calor, que es generado mediante la reacción de combustión del oxígeno y aire enriquecido con el hierro y azufre contenidos en el concentrado, constituyendo un proceso de fusión autógena.

Los productos resultantes de esta fusión son una fase metálica conocida como “eje”, que contiene cobre, una fase de escoria y una tercera fase que corresponde a gases.

1.5.3. Conversión

La conversión es un proceso metalúrgico que se realiza en los denominados Convertidores Pierce Smith (CPS) mediante el soplado (inyección de aire) al metal fundido, esto genera que el contenido de cobre, presente en el eje, se separe del azufre y hierro. Esto produce cobre blíster con aproximadamente un 98% de pureza. El óxido de hierro es combinado con sílice, produciéndose escoria que se envía a los Hornos de Limpieza de Escoria (HLE) para la recuperación del cobre contenido.

1.5.4. Refinación y moldeo

El cobre blíster es retirado de los Convertidores Pierce Smith y es llevado a dos Hornos de Refinación (HR). En este punto existen 2 etapas:

- La primera etapa consiste en la inyección de aire bajo el baño fundido, lo que permite la oxidación del azufre.
- La segunda etapa consiste en la eliminación del exceso de oxígeno incorporado en la etapa anterior, mediante una reducción con petróleo o gas natural.

Al final de esta última etapa, el cobre con una pureza del 99,6% está en condiciones de continuar con la etapa del moldeo, en donde se vierte en una rueda de 16 molde, que posteriormente entregará ánodos de cobre que pesan entre 280 y 420 [kg], según determine el cliente.

1.5.5. Limpieza de escoria

El proceso de limpieza de escoria se desarrolla en hornos basculantes llamados Hornos de Limpieza de Escoria (HLE), los cuales trabajan las escorias producidas en los Convertidores Pierce Smith y el Horno Flash. El proceso consiste en la reducción de la magnetita contenida en la escoria utilizando un combustible (petróleo diésel). De esta manera, las partículas de cobre (aproximadamente 1%) se separan de la masa fundida y sedimentan en el fondo del horno, formando una capa de eje, que se extrae a través de sangrías y se retorna a los convertidores. La escoria restante es vaciada en ollas y transportada mediante camiones para ser descargada en el escorial.

1.5.6. Manejo de gases y producción de ácido

Los gases provenientes del Horno Flash, son enfriados en una caldera recuperadora de calor cuyo vapor generado se utiliza en el proceso de secado de concentrado. Los gases pasan luego por un precipitador electrostático seco en donde se recupera el polvo metalúrgico, que posteriormente es retornado al proceso de fusión. En el caso de los gases generados en los CPS, son enfriados mediante enfriadores radiactivos y una caja recuperadora de polvo para

luego, en forma paralela con los gases del Horno Flash, ser transportados y tratados en la planta de ácido sulfúrico. Esta planta genera alrededor de 1.500 [ton/día] de ácido.

1.5.7. Chancado de escoria

Para lograr el proceso de chancado de escoria, se deben priorizar los procesos en base a la cantidad de cobre que poseen.

La sección que posee mayor prioridad de chancado son los convertidores, correspondientes a limpieza de las cáscaras de ollas, con un valor aproximado de 30% de cobre. En menor medida se procesan los excedentes de las limpiezas de los Hornos de Refinación y de los Hornos de Limpieza de Escoria.

Cuando se determina que la escoria obtenida de los Hornos de Limpieza de Escoria posee un nivel aceptable en ley de cobre (mayor a 2% de cobre, denominado como “revuelto”), ésta es reprocesada y enviada a chancar, siendo posteriormente enviadas al Horno Flash con el objetivo de recuperar dicho cobre.

La planta de chancado se compone principalmente de equipos como: harneros, cintas transportadoras, chancadores y equipo de transporte.

El chancador permite reducir el tamaño de los fragmentos mayores, hasta obtener un tamaño uniforme máximo de 2 [mm], que permite un óptimo reingreso al Horno Flash.

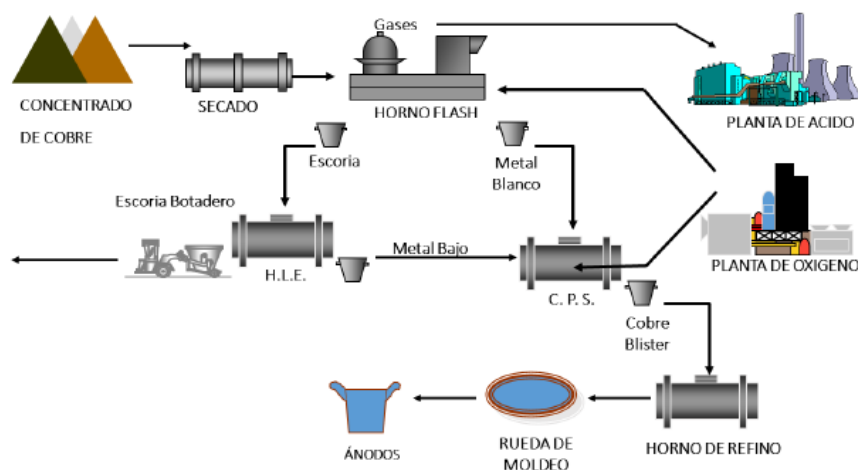


Ilustración 1.6: Esquema General del Proceso Productivo de Fundición Chagres.

1.6. Cientes

Los clientes de Fundición Chagres respecto a las ventas de ánodos de cobre se muestran en la Tabla 1.1, junto a sus características principales.

Tabla 1.1 Características de ánodos según Clientes.

Cientes	LS Nikko	Jiangxi	Aurubis	Codelco Ventanas	Dongying	XIANGGUANG
% Cu	99,6	$\geq 99,3$	99,5 - 99,7	99,5 – 99,7	99,5 – 99,7	99,5 – 99,7
Peso [Kg]	420 $\pm$ 10	397 $\pm$ 5	420 $\pm$ 6	275 $\pm$ 5	276,5 $\pm$ 5	385 $\pm$ 5

Capítulo II: Estudio de la situación actual

2.1. Situación geográfica

La Fundición Chagres está emplazada en el Valle del Aconcagua, una zona que es por excelencia agrícola, colinda además con la ruta 60-CH, con la única ruta de entrada a Catemu y con el Río Aconcagua. En la periferia se encuentran las localidades de Llay-Llay, Santa Cecilia, Panquehue, Santa Virginia, San Roque, Lo Campo y San Felipe (ver Ilustración 2.1).

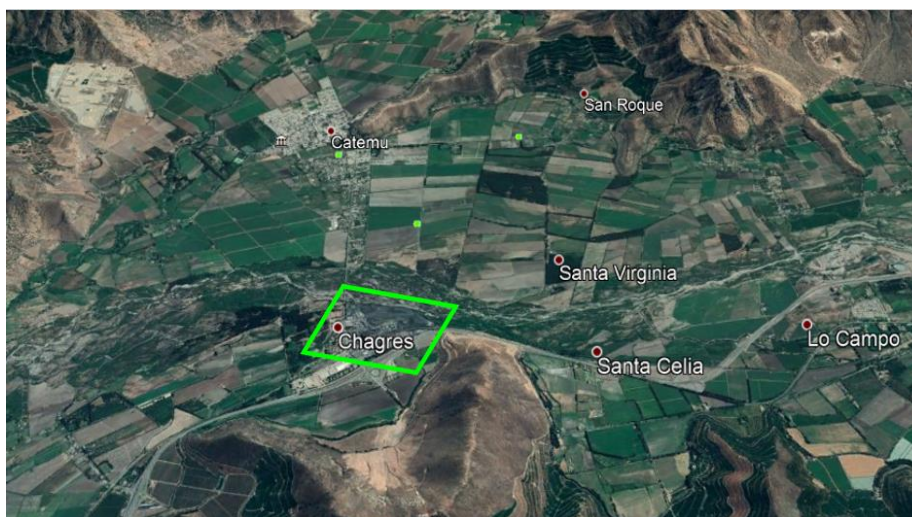


Ilustración 2.1: Ubicación geográfica de Fundición Chagres.

Tabla 2.1: Condiciones ambientales y geográficas de la ubicación de Fundición Chagres.

Condiciones ambientales y geográficas	
Ubicación	Chagres, Chile
Presión Barométrica	962 [mbar]
Elevación	420 [m] sobre el nivel del mar
Temperatura ambiente, min/máx	-4,4 / +38,5 °C
Temperatura ambiente, promedio	20 °C
Humedad relativa, min/máx	50/ 82%
Humedad relativa, promedio	66%
Condición Sísmica	Zona 3, acc. NCh 2369:2003
Atmosfera	Presencia de polvo, Húmedo, Corrosiva, presencia de SO ₂

Fundición Chagres posee 4 estaciones para medir la condición del aire, ver Ilustración 2.2:

1. Estación Catemu: mide SO₂ y MP10.
2. Estación Santa Margarita: mide SO₂.
3. Estación Lo Campo: mide SO₂ y MP10.
4. Estación Romeral: mide SO₂.

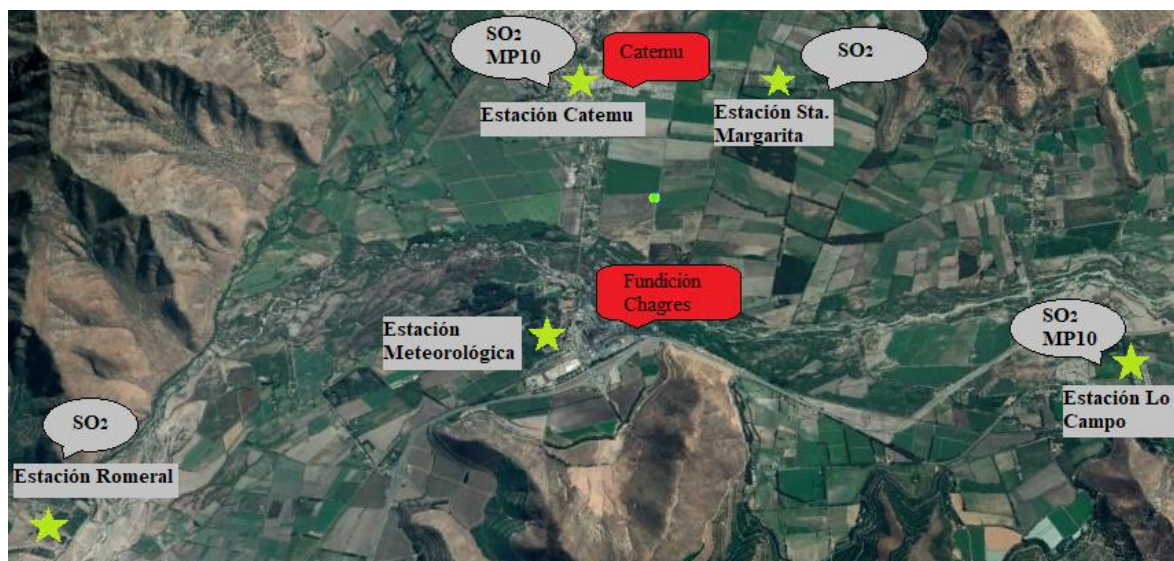


Ilustración 2.2: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo del aire.

Cabe señalar que estas localidades son de tipo agrícola, por lo que un impacto de tipo ambiental sería directo.

2.2. Contexto

El contexto de restricciones ambientales, comienza a gestarse debido a la incorporación de Chile a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en el año 2005. Dentro del acuerdo se indicó “Las actividades de fundición todavía son causantes del grueso de las emisiones y deben reducir aún más” [1] por lo que se recomendó “Avanzar en el desarrollo de normas de emisión nacional, que incluyan la regulación de contaminantes tóxicos en el aire y que reduzca aún más el impacto de la contaminación por SO₂ y arsénico” [1].

En base a lo recomendado anteriormente, se decide elaborar la presente norma de emisión , en la cual se consideran criterios técnicos, económicos y sociales, entre los que destacan: un completo diagnóstico de la condición tecnológica asociada a cada fundición existente; la evolución de la emisión de contaminantes de las fuentes, a la atmósfera; la toxicidad y efectos de los contaminantes; la eficiencia y eficacia de los instrumentos ambientales vigentes que les son aplicables a las fuentes en materia de emisiones al aire; la disponibilidad de tecnologías de control y su potencial de reducción de emisiones; la tendencia y enfoque de la regulación internacional.

Por consiguiente, el año 2013 se promulgó, por parte del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), el Decreto Supremo 28/2013.

2.2.1. Decreto Supremo 28/2013

Bajo el amparo de La Constitución Política de la República, que reconoce en el artículo 19 N°1 el derecho a la vida y la integridad física de las personas, además en su artículo 19 N°8, el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. En este sentido y sobre la base de la Ley N° 19.300, sobre bases generales del medio ambiente, el Estado dicta normas de emisión con el propósito de prevenir el riesgo sobre la salud de las personas, calidad de vida y el medio ambiente.

El DS 28/2013 aplica sobre las emisiones de fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. Como resultado de su aplicación busca reducir las emisiones de material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), arsénico (As) y mercurio (Hg). Para dichos contaminantes existe evidencia suficiente y concreta, en donde se comprueban los efectos adversos crónicos y agudos sobre la salud de las personas expuestas (ver Tabla 2.2) y el medio ambiente.

Las fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico se caracterizan por generar emisiones al aire de 2 maneras principales:

- Gases Fugitivos.
- Gases por Chimeneas.

Dichas emisiones se caracterizan por contener:

- SO₂.
- Material Particulado (MP).
- Trazas de sustancias tóxicas como As, Hg, Pb, Ni y otros.

Tabla 2.2: Elementos contaminantes y efectos en la salud [6][7][8][9].

Contaminante	Efecto
SO ₂	• Hospitalizaciones por causa respiratoria y cardiovasculares • Consultas de urgencia por asma • Exacerbaciones o crisis de asma • Síntomas respiratorios agudos
MP 2,5	• Mortalidad prematura en adultos • Bronquitis aguda y crónica • Hospitalizaciones por causa respiratoria y cardiovascular • Consultas de urgencia por asma • Infarto agudo al Miocardio no fatal • Enfermedad respiratoria alta y baja • Restricción de actividad diaria menor • Días de trabajo perdidos • Exacerbación del asma • Mortalidad Infantil
As	• Cáncer a la piel • Cáncer de pulmón • Cáncer a la vejiga • Infertilidad y/o aborto en mujeres • Mortalidad Cardiovascular

Pb	• Insuficiencia renal aguda • Dolores abdominales intensos • Anemia Hemolítica • Convulsiones • Pérdida de coeficiente intelectual en niños
Hg	• Ataxia • Insuficiencia Renal • Pérdida de coeficiente intelectual en niños
Cd	• Osteoporosis • Insuficiencia renal • Edema Pulmonar

En caso de captura y fijación de SO₂ para fuentes de emisión existentes se seleccionó un escenario de 95%, ya que presenta mayor eficiencia y “costo efectividad” en las reducciones logradas. Con este escenario se calcularon los límites de emisión de SO₂ para cada fundición existente, respecto a la capacidad nominal declarada el año 2010 (ver Tabla 2.8) y los contenidos proyectados de azufre (S) en el concentrado. De la misma forma se aplicó a los límites de emisión de As.

Con respecto a los límites de Hg en las plantas de ácido se estimó suficiente exigirles la medición e información de los niveles de Hg, dado que se consideró como co-beneficio, que las emisiones de esta sustancia se redujeran gracias a las mejoras aplicadas.

2.2.1.1. Emisiones declaradas por las fundiciones en el año 2010

- **Dióxido de azufre**

Tabla 2.3: Emisiones de SO₂ de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.

Fundiciones	SO ₂ [Ton/año]			% de captura S (e)
	Globales (a)	Chimeneas (a)	Fugitivas (d)	
Chuquicamata	108.214	41.687	66.527	91,0%
Altonorte	39.958	31.250	8.708	93,7%
Potrerillos	65.280 (b)	13.679	51.601	83,5%
Hernán Videla Lira	21.344	10.810	10.534	89,4%
Ventanas	15.590	1.714	13.876	93,8%
Chagres	13.994	3.374	10.570	95,7%

Caletones	128.468 (c)	41.844	86.624	88,0%
a- Emisiones globales de SO ₂ año 2010, declaradas en encuesta aplicada al sector, año 2011. b- Emisión declarada corresponde al 15% de las emisiones sin control, considerando alimentación año 2010 de 640kton/año de concentrado y 34% de S. c- Emisión global declarada, se distribuyó por chimenea según balance de masa, otorgado por MMA. d- Emisiones obtenidas del diferencial entre lo declarado global y por chimenea. e- Información entregada por el sector al MMA, año 2011				

- **Arsénico**

Tabla 2.4: Emisiones de As de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.

Fundiciones	As [Ton/año]			% de captura As (d)
	Globales (a)	Chimeneas (a)	Fugitivas (c)	
Chuquicamata	75	4,8 (b)	70,2	98,8%
Altonorte	83	21,0 (b)	62,0	96,4%
Potrerrillos	460	64,8	395,2	83,1%
Hernán Videla Lira	14	8,4 (b)	5,6	88,6%
Ventanas	118	13,7	104,3	84,1%
Chagres	2,7	1,3 (b)	1,4	99,2%
Caletones	201	99,0 (b)	102	90,3%
a- Emisiones globales de As año 2010, declaradas en encuesta aplicada al sector, año 2011. b- Emisión global declarada, se distribuyó por chimenea según balance de masa, otorgado por MMA. c- Emisiones obtenidas del diferencial entre lo declarado global y por chimenea. d- Porcentaje de captura de As se calculó en base a la capacidad nominal, el porcentaje de As promedio para el año 2010 y la emisión global de As declarada.				

- **Material Particulado**

Tabla 2.5: Emisiones de MP de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.

Fundiciones	MP [Ton/año]		
	Globales (a)	Chimeneas (a)	Fugitivas (g)
Chuquicamata	1.850 (b)	701,5	1.148,5
Altonorte	1.043 (c)	438,8	604,2
Potrerrillos	3.900 (d)	2.146,6	1.753,4
Hernán Videla Lira	600 (e)	484,4	115,6
Ventanas	405	379,5	25,5
Chagres	743	187,0	556,0
Caletones	1.565 (f)	259,6	1.305,4
a- Emisiones globales de MP año 2010, declaradas en encuesta aplicada al sector, año 2011. b- Informe de seguimiento Plan de Descontaminación de Chuquicamata, año 2005.			

c-	Elaboración inventario de Emisiones para MP 10 y SO ₂ , sector La Negra Antofagasta, 2010.
d-	Estimación factores emisivos EPA.
e-	Plan de descontaminación de la Fundición HVL, año 1995.
f-	Estudio diagnóstico plan de gestión calidad del aire VI Región, DICTUC, año 2008.
g-	Emisiones obtenidas del diferencial entre lo global y por chimeneas.

- **Mercurio**

Tabla 2.6: Emisiones de Hg de las Fundiciones en Chile durante el año 2010.

Fundiciones	Hg [Ton/año]		
	Globales (a)	Chimeneas (a)	Fugitivas (c)
Chuquicamata	3,3	0,5	2,8
Altonorte	1,6	0,1	1,5
Potrerrillos	1,0	0,1	0,9
Hernán Videla Lira	0,5	0,0	0,5
Ventanas	1,7	0,1	1,6
Chagres	0,8	0,5	0,3
Caletones	1,5	0,1	1,4
a- Factor emisivo (5,81 [mg/kg]), Hylander and Herbert, año 2008.			
b- Emisión Global, se distribuyó por chimenea según MMA.			
c- Emisiones obtenidas del diferencial entre lo global y por chimeneas.			

De acuerdo a lo establecido en el DS 28/2013, las emisiones por procesos unitarios en fundiciones existentes y nuevas quedaron fijos como se refleja en la Tabla 2.7

Tabla 2.7: Límites establecidos para para plantas existentes y nuevas, según DS 28/2013.

Restricciones	Plantas Existentes	Plantas Nuevas
Azufre y Arsénico	< 5% en peso alimentación	< 2% en peso alimentación
Planta de Ácido	SO ₂ < 600 ppm SO ₂	SO ₂ < 200 ppm SO ₂
Planta de Ácido	As < 1 [mg/Nm ³] As	As < 1 [mg/Nm ³], Hg < 0,1 [mg/Nm ³]
Secadores y HLE	MP < 50 [mg/Nm ³]	MP < 30 [mg/Nm ³]
HLE	As < 1 [mg/Nm ³] As	As < 1 [mg/Nm ³] As
Chimeneas	Opacidad(*) < 20%	Opacidad(*) < 20%

Lo anterior se considera a partir de las condiciones normales, las cuales corresponden a 25°C y 1 [atm].

Los límites máximos de emisión al aire para las fundiciones existentes que no deben ser excedidos por año calendario, además de su plazo para el cumplimiento de la normativa quedan reflejados en la siguiente Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Emisiones de SO₂ y As permisibles para las Fundiciones en Chile con la nueva normativa.

Fundiciones	Vigencia	SO2 [Ton/año]	As [Ton/año]
Chuquicamata	2018	49.700	476
Altonorte	2016	24.000	126
Potrerrillos	2018	24.400	157
Hernán Videla Lira	2018	12.880	17
Ventanas	2018	14.650	48
Chagres	2016	14.400	35
Caletones	2018	47.680	130

2.2.2. Prácticas operacionales para el control de emisiones

Según el Artículo N°15, las fuentes emisoras deben cumplir con lo siguiente:

- a) Informar a lo menos con un mes de anticipación, a la Superintendencia del Medio Ambiente y a la Seremi del Medio Ambiente respectiva, sobre el encendido o detención programada de la planta de ácido y del horno de fusión, así como también la duración de cada periodo de mantención.
- b) Incorporar en el Plan de operación y mantención de los sistemas de captura de gases lo siguiente:
 - i. Las introducciones del proveedor de los equipos y los procedimientos especificados para el plan de mantención.
 - ii. Inspección mensual que incluya observaciones de la apariencia física de los equipos y verificación del funcionamiento de los componentes de los mismos.
 - iii. Un plan de contingencia que tenga por objetivo informar inmediatamente cuando ocurra un evento a la SMA y a la Seremi del Medio Ambiente respectiva, así como las acciones correctivas para enfrentar las fallas relacionadas con fugas o emisiones al aire.
 - iv. Incorporar un sistema de detección de rotura de manga. En caso de rotura de alguna manga, esta deberá ser reemplazada oportunamente. Se debe

incorporar un registro de fechas de detección y reemplazo de mangas en un anexo del informe mensual respectivo.

- v. Detener la operación del secador en el caso que el filtro de mangas u otro equipo de control de MP no se encuentre operando.
- vi. Detener la operación de los hornos de fusión y de conversión en caso que las plantas de ácido no se encuentren operando.
- vii. Cada lavador de gases (scrubber) deberá mantener la caída de presión horaria y el flujo de agua igual o sobre el nivel mínimo establecido por el diseño.
- viii. Ante cualquier evento que implique la detención de algún equipo de control de emisiones de aire, se debe registrar en el informe mensual respectivo.

2.3. Contexto aplicado

La normativa ambiental DS 28/2013 fue promulgada en diciembre de 2013. En diciembre de 2016 entró en vigencia para fundiciones con plantas de ácido de doble absorción y en diciembre de 2018 será aplicada para instalaciones con planta de ácido de absorción simple (ver Tabla 2.9).

Tabla 2.9: Fecha límite para entrada en vigencia según la normativa del DS28/2013.

Fundiciones en Chile	Año de aplicación de normativa ambiental
Chiquicamata	12-12-2018
Altonorte	12-12-2016
Potrerrillos	12-12-2018
Hernán Videla Lira	12-12-2018
Ventanas	12-12-2018
Chagres	12-12-2016
Caletones	12-12-2018

En el caso de las fundiciones Chagres y Altonorte, que fueron sometidas al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, se constató que ambas contaban con exigencias ambientales que limitaban sus emisiones de SO₂ a niveles menores que los exigidos por el decreto. Para el caso del As, el límite de emisiones para Fundación Chagres se estableció utilizando un criterio de 95% de captura. En la Tabla 2.10 se muestra el listado y los límites establecidos para la Fundación una vez puesta en marcha la aplicación del DS 28/2013.

Tabla 2.10: Límites establecidos y plazos para Fundición Chagres [1].

Materia		Límite y verificación	Plazo y cumplimiento límite de verificación (**)
Límite de emisión chimenea (*)	MP Secadores	≤ 50 [mg/Nm ³], mensual	12/12/2016 3 años desde el 12/12/2013
	MP HLE	≤ 50 [mg/Nm ³], mensual	
	As HLE	≤ 1 [mg/Nm ³], mensual	
	HR	Nivel de opacidad de los humos $\leq 20\%$	
	Concentración SO ₂	≤ 600 [ppm], promedio horario durante cada hora de operación de la Planta de Ácido	
	Concentración As Planta de Ácido	≤ 1 [mg/Nm ³], mensual	

Para poder dar cumplimiento a dichos márgenes, Fundición Chagres tuvo que tomar las siguientes medidas:

- Tratar Gases de los Hornos de Limpieza de Escoria para disminuir la emisión de As y MP.
- Tratar Gases de los Hornos de Refinación para alcanzar los valores de opacidad establecidos por el decreto.
- Disminuir emisión de material particulado en el proceso de secado de concentrado de cobre.

2.4. Proyecto Normativo Fundición Chagres

Al momento de entrar en vigencia la nueva normativa, Fundición Chagres ya cumplía con 6 de los 10 estándares exigidos (ver Tabla 2.11)

Tabla 2.11: Parámetros que Fundición Chagres cumplía hasta la promulgación del DS 28/13.

Proceso	Norma	
SO ₂ global y cifra de emisión	> 95% Recuperación	✓
	SO ₂ < 14.400 [Ton/año]	✓
Arsénico global y cifra de emisión	> 95% Recuperación	✓
	As < 35 [Ton/año]	✓
Planta de ácido	SO ₂ horas de < 600 ppm	✓
	As < 1 [mg/Nm ³]	✓
Secado de concentrados	MP < 50 [mg/Nm ³]	✗
Hornos de limpieza de escorias	MP < 50 [mg/Nm ³]	✗
	As < 1 [mg/Nm ³]	✗
Hornos de refino	Opacidad < 20%	✗

Por lo tanto, para cumplir con los puntos restantes se invirtieron US\$ 70,5 millones en 4 proyectos para abordar la normativa a cabalidad:

1. Refinación de cobre, planta de tratamiento de gases - hornos de refinación (PTG-HR's).
2. Limpieza escorias, planta de tratamiento de gases - hornos de limpieza de escoria (PTG-HLE's).
3. Planta de separación sólido/líquido.
4. Secado de concentrado, secador Kumera.



Ilustración 2.3: Vista aérea Fundición Chagres.

2.4.1. Plata de Tratamiento de Gases

El objetivo de estas plantas es tratar los gases generados por los hornos de refinación (HR's) y los hornos de limpieza de escoria (HLE's) respectivamente, con el propósito de emitir gases (ya tratados) hacia la atmósfera, con contenidos de:

- Menos de 50 [mg/Nm³] de material particulado.
- Menos de 1 [mg/Nm³] de arsénico total.

Cada planta de tratamiento de gases tiene una capacidad de tratamiento de 45000 [Nm³/h] de gases.

Las plantas de tratamiento de gases (PTG) tratan los gases en sus respectivas áreas:

- PTG-HR's
 - Área de manejo de gases.
 - Área tratamiento de gases.
- PTG-HLE's
 - Área de manejo de gases.

- Área tratamiento de gases.
- Suministro de agua de procesos y agua de emergencia.

Dentro de las cuales, cada área tiene como objetivos específicos:

- Área manejo de gases:
 - Captar los gases emitidos por los equipos por boca.
 - Enfriar los gases mediante dilución con aire en campana.
 - Transportar los gases a las áreas de limpieza de gases.
 - Transportar los gases limpios a chimenea y hacia la atmósfera.
- Área tratamiento de gases:
 - Enfriar los gases mediante una “torre quench” (duchas de agua).
 - Limpiar los gases para retirar el material particulado y el arsénico.
 - Efectuar una segunda limpieza mediante precipitación electrostática.
 - Enviar el agua que contiene los sólidos retirados hacia el área de separación sólido/líquido.
- Suministro de agua de procesos y agua de emergencia:
 - Abastecer ambas plantas de tratamiento con el agua a utilizar en la operación de los procesos.
 - Disponer de agua de emergencias (en caso necesario) para mantener la integridad de las plantas.

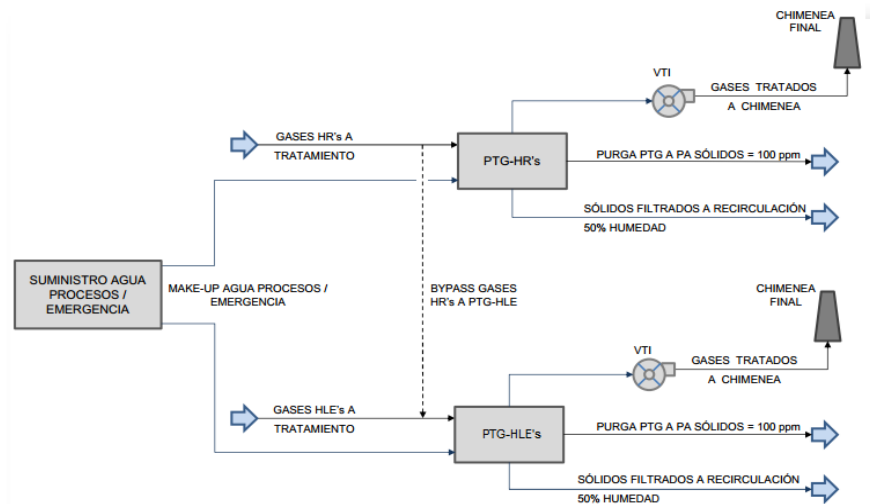


Ilustración 2.4: Diagrama de las PTG HR's y PTG HLE's

2.4.1.1. Planta de tratamiento de gases de hornos de refinación (PTG-HR's)

La Fundición Chagres cuenta con dos hornos de refinación (HR). Son hornos basculantes, que procesan el cobre blíster proveniente de los Convertidores Pierce Smith (CPS).

El horno de refinación tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 2.12: Dimensiones de los hornos de refinación.

Sección	Dimensiones
Diámetro externo	3,96 [m]
Largo externo	7,01 [m]
Capacidad de carga	180 [Ton Cu]

Cada ciclo de proceso presenta cuatro etapas:

1. Oxidación.
2. Reducción.
3. Moldeo.
4. Carguío.

Debido a que cada etapa genera gases con distintas características, existen diferentes combinaciones posibles de gases a ser consideradas, ya que se operan con los dos hornos de forma paralela. En promedio, ambos hornos generan 35200[Nm³/h] (ver Tabla 2.13).

Tabla 2.13: Combinaciones operacionales posibles en hornos de refinación.

Combinaciones operacionales posibles en hornos de refinación				
HR1 / HR2	Oxidación	Reducción	Moldeo	Carguío
Oxidación	No	Si	Si	Si
Reducción	-	No	Si	Si
Moldeo	-	-	No	Si
Carguío	-	-	-	Si

Dichos gases presentan las siguientes características:

Tabla 2.14 Gases a tratamiento y tratados promedios en hornos de refinación.

Gases a tratamiento y tratados en promedio				
Gases	HR1	HR2	HR1+HR2	Tratados*
Flujo [Nm ³ /h]	17601	17601	35202	42084
Temperatura °C	326	326	326	58,8
H ₂ O % [v/v]	3,4	3,4	3,4	18,6
SO ₂ % [v/v]	0,03	0,03	0,03	0,03
MP [mg/Nm ³]	288,7	288,7	288,7	19,3
As [mg/Nm ³]	5,7	5,7	5,7	0,26
* Gases tratados incluyen aire de aisladores de precipitadores electroestáticos				

2.4.1.1.1. Área de manejo de gases de hornos de refinación

El circuito de manejo de gases de hornos de refinación hasta la planta de tratamiento de gases comienza luego de las dos campanas de captación de gases, las que además succionan aire atmosférico, sobre las bocas de cada horno. Los gases salen a una temperatura de 1.250°C, desde donde son transportados hasta la planta. En este punto se produce una dilución producto de la mezcla del aire con los gases, llevándolos a una temperatura de aproximadamente 400°C.

El control de tiraje para la extracción y transporte de gases de ambos hornos se realiza por medio de la modulación de velocidad de giro del VTI ubicado a la salida de la planta de tratamiento de gases de los hornos de refinación. Este equipo cuenta con un VDF para variar el flujo de alimentación a la planta, teniendo un flujo máximo de 45.000 [Nm³/h], con el fin de mantener la presión negativa hasta la entrada de la torre quench (ver Ilustración 2.5).

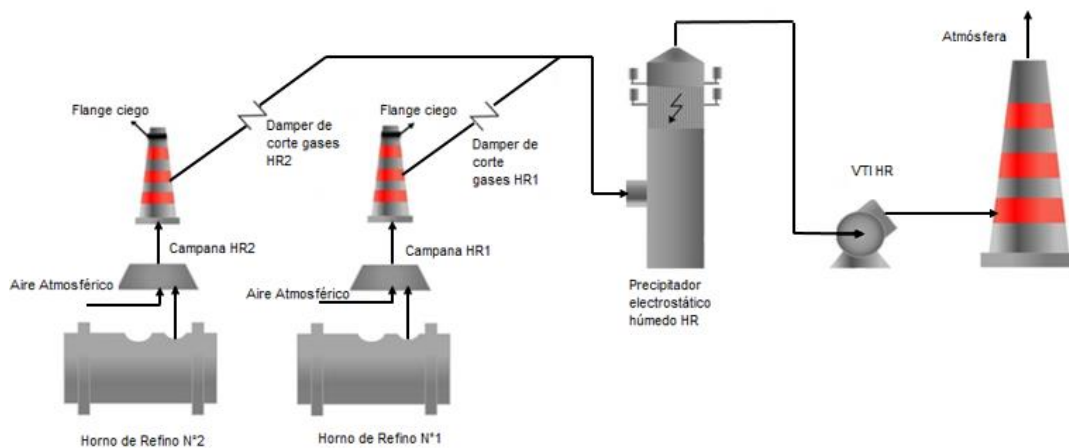


Ilustración 2.5: Esquema del circuito de gases desde hornos de refinación hasta chimenea.

2.4.1.1.2. Área de tratamiento de gases de hornos de refinación

El sistema de tratamiento de gases tiene el objetivo de asegurar la calidad de los gases de HR's emitidos al ambiente, teniendo una concentración de MP <50 [mg/Nm³], con la que se consigue una opacidad inferior a 20% y con un contenido de As <1 [mg/Nm³].

La planta de tratamiento está compuesta por una torre dividida en dos secciones: la parte inferior corresponde a un lavador de tipo quench y en la parte superior un precipitador electroestático húmedo (Wesp) (ver Ilustración 2.6).



Ilustración 2.6: Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación (Wesp).

Los gases provenientes del tren de los hornos (con una temperatura cercana a 400°C) son recibidos en la zona de la torre quench. En este lugar, los gases son enfriados y saturados en agua en forma adiabática, hasta aproximadamente 60°C , siendo impactados en primer lugar con chorros de agua para un enfriamiento rápido a la entrada de la torre, y luego haciéndolos circular en contracorriente con un flujo de agua de procesos.

El agua de procesos es utilizada en la recirculación hacia el sistema quench, ubicado en la entrada de la torre y en la parte superior de la misma. Esta agua es impulsada por medio del uso de bombas y se inyecta en ambos puntos de la zona 1uench mediante un sistema de aspersión que asegura un eficiente contacto del líquido con los gases calientes.

La eficiencia del proceso de enfriamiento depende de la razón líquido/gas y del tiempo que el gas permanezca al interior de la torre.

El control de temperatura de enfriamiento se logra mediante el flujo constante de agua, controlado por dos bombas, que a su vez es determinado por el flujo máximo de gas que ingresa. Las bombas mencionadas anteriormente, son dos bombas de recirculación que operan en forma continua, con un caudal conjunto de $220 \text{ [m}^3/\text{h]}$, existiendo una tercera bomba en stand-by para ser ocupada en caso de que falle alguna de las anteriores. Del caudal anterior, alrededor de $10 \text{ a } 20 \text{ [m}^3/\text{h]}$ son usados para alimentar la planta de separación

sólido/líquido en la tarea de depurar el agua de lavado de gases. El caudal restante, entre 200 y 210 [m³/h], es usada para alimentar los aspersores de la torre quench.

Una vez enfriados, los son pasados al precipitador electrostático húmedo, los gases que vienen con gotas de neblina, donde son cargadas eléctricamente mediante electrodos de descarga, desde donde las partículas que aún están presentes en el gas, son guiadas a la pared del electrodo de recolección por efecto de un campo electrostático.

El precipitador cuenta con un sistema de lavado, que es realizado por la bomba de flushing con el objetivo de desprender el material particulado que se acumula en los electrodos de recolección, y que a su vez reduce la eficiencia.

En la parte inferior de la torre quench, se recibe: el agua de make up (agua fresca), el agua de clarificado del sistema de separación sólido/líquido, el retorno del agua de flushing y es utilizado como reservorio para suministrar el agua, tanto para el lavado y enfriamiento de los gases, así como para la operación de flushing del precipitador.

Finalmente, el ventilador de tiro inducido se encarga de llevar los gases limpios hacia la chimenea y posteriormente a la atmósfera.

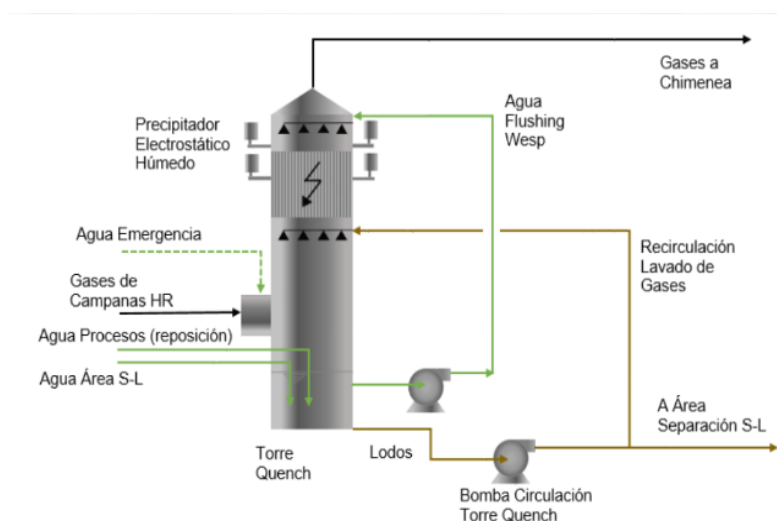


Ilustración 2.7: Esquema del precipitador electrostático húmedo y bombas asociadas.

2.4.1.2. Planta de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria
(PTG-HLE's)

Fundición Chagres cuenta con dos hornos de limpieza de escoria. Estos hornos basculantes, procesan la escoria proveniente del Horno Flash y en menor medida, de los Convertidores Pierce Smith (CPS).

El horno de limpieza de escorias tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 2.15: Dimensiones de los hornos de limpieza de escoria.

Sección	Dimensiones
Diámetro externo	3,96 [m]
Largo externo	7,92 [m]
Capacidad de carga	60 [Ton]

Cada ciclo de proceso presenta cinco etapas:

- a) Espera.
- b) Carguío.
- c) Reducción.
- d) Sedimentación.
- e) Descarga.

Para los efectos de la generación de calidades de gases, se pueden agrupar en:

- i. Etapa de reducción.
- ii. Etapa de mantención térmica.

El proceso de reducción tiene como objetivo recuperar el cobre contenido en la escoria, mediante la disminución del contenido de magnetita (Fe_3O_4) presente en ella. Esto se logra mediante la inyección de petróleo diésel (hidrocarburo) y aire, que generan los elementos básicos que reaccionan con la magnetita, disminuyendo el oxígeno que contiene. Al hacer esto, se logra una disminución de la viscosidad, que a su vez permite que las partículas de cobre decanten. Anteriormente, el hidrocarburo utilizado era ENAP-6 pero con la incorporación de la planta de tratamiento de gases se optó por cambiarlo, ya que este último

es un combustible pesado de mayor suciedad que el diésel, lo cual dificultaría la labor de la planta de tratamiento de gases.

Por lo tanto, como resultado del proceso de limpieza de escorias, se obtiene:

- Plateado.
- Escoria final (<1% de Cu).
- Gases + polvos [CO, CO₂, SO₂, H₂O, As, C (material particulado)].

A diferencia de los hornos de refinación, en los hornos de limpieza de escoria (HLE's) solo existirán dos combinaciones posibles: Etapa de reducción y mantención térmica.

Tabla 2.16: Gases a tratamiento y tratados promedios en hornos de limpieza de escoria.

Gases a tratamiento y tratados en promedio				
Gases	HLE1	HLE2	HLE1+HLE2	Tratados*
Flujo [Nm ³ /h]	22.085	22.085	35.202	47.584
Temperatura °C	162	162	142	42
H ₂ O % [v/v]	2,52	2,52	2,52	8,27
SO ₂ % [v/v]	0,06	0,03	0,06	0,05
MP [mg/Nm ³]	200	200	200	21,4
As [mg/Nm ³]	240	240	240	0,37
*Gases tratados incluyen aire de aisladores de precipitadores electrostáticos				

2.4.1.2.1. Área de manejo de gases de hornos de limpieza de escoria.

El circuito de manejo de gases de hornos de limpieza de escoria hasta la planta de tratamiento de gases es similar a la de los hornos de refinación, ya que comienzan con la succión de los gases provenientes de las campanas de captación de gases, y de aire atmosférico, sobre las bocas de cada horno a una temperatura de 1.250°C, desde donde son transportados hacia la planta mediante la succión realizada por el ventilador de tiro inducido, con un flujo de alimentación máximo es de 45.000 [Nm³/h]. En este punto se produce una dilución producto de la mezcla con aire, llevándolos a una temperatura de 120-200°C (ver Ilustración 2.8).

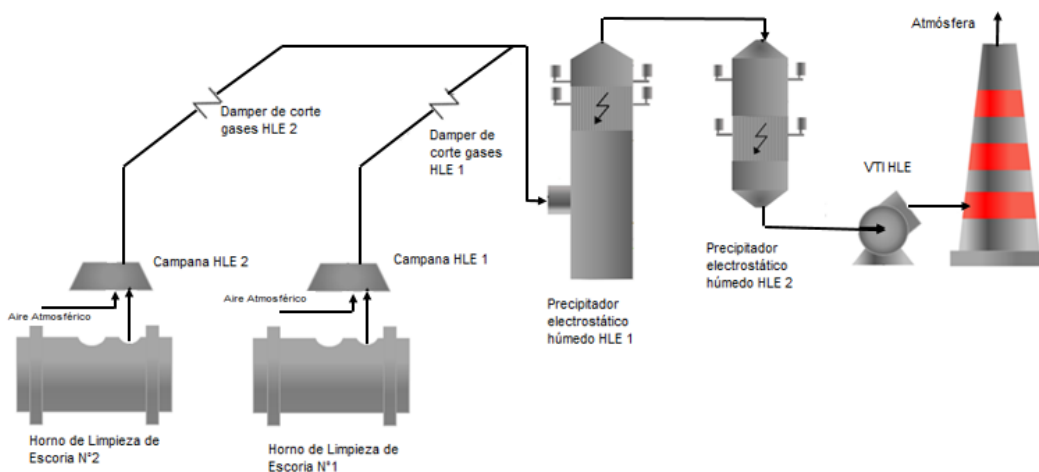


Ilustración 2.8: Esquema del circuito de gases desde hornos de limpieza de escoria hasta chimenea.

2.4.1.2.2. Área de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria

En esta área se entregan gases limpios a una temperatura de 40 a 50°C, con un contenido de sólidos $< 50 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$ y $\text{As} < 1 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$, los cuales serán impulsados posteriormente hacia la chimenea.

De manera similar a la planta de tratamiento de gases de hornos de refinación (PTG-HR's) la planta de tratamiento está compuesta por una torre quench y en la parte superior un precipitador electrostático húmedo (Wesp 1), además de un segundo precipitador (Wesp 2) en serie ver Ilustración 2.9.



Ilustración 2.9: Precipitador electrostático húmedo N°1 y N°2 de hornos de limpieza de escoria.
(Wesp 1 y 2 visto de derecha a izquierda)

Los gases provenientes del tren de los hornos de limpieza de escorias, en especial durante el proceso de reducción, a una temperatura entre 100 y 200°C, son recibidos en la zona quench de la torre donde son enfriados y saturados en agua en forma adiabática hasta aproximadamente los 40-50°C.

Esta agua es impulsada por medio del uso de 2 bombas de recirculación (existiendo una 3era en stand-by) y se inyecta en ambos puntos de la torre quench mediante un sistema de aspersión en forma continua con un caudal conjunto de entre 200 y 210 [m³/h].

Además, estas bombas suministran un caudal de entre 10 a 20 [m³/h] para alimentar a la planta de separación sólido / líquido, con el objetivo de depurar el agua de lavado de gases.

De la misma forma que en la PTG – HR's, la eficiencia del proceso de enfriamiento depende de la razón líquido/gas y del tiempo que el gas permanezca al interior de la torre.

Una vez enfriados, los gases pasan a las dos etapas de precipitación (ambos precipitadores en serie), los gases que provienen de la zona de enfriamiento quench y lavado, que contienen

gotas de neblina, son cargadas eléctricamente mediante electrodos de descarga y guiadas a la pared del tubo por efecto de campo electroestático.

Los precipitadores cuentan con un sistema de limpieza conformado por una bomba de flushing común para los Wesp 1 y Wesp 2, la cual utiliza el agua de lavado de gases disponible en la torre quench para desprender el material particulado acumulado en los electrodos de recolección.

Adicionalmente el Wesp 2, cuentan con el sistema “fogging”, cuyo objetivo es asegurar que el gas esté saturado de agua (agua make up) de manera que exista condensación en la superficie de los tubos de recolección, generando un lavado sobre la superficie de los tubos. Este proceso se da durante los periodos de reducción de los hornos de limpieza de escoria.

En la parte inferior de la torre quench se recibe: el agua de make up (agua fresca), el agua de clarificado del sistema de Separación Sólido/Líquido, el retorno del agua de flushing de ambos precipitadores y el condensado producto del fogging en el Wesp 2.

Finalmente, el VTI se encarga de llevar los gases limpios desde el Wesp 2 hacia la chimenea y posteriormente a la atmósfera.

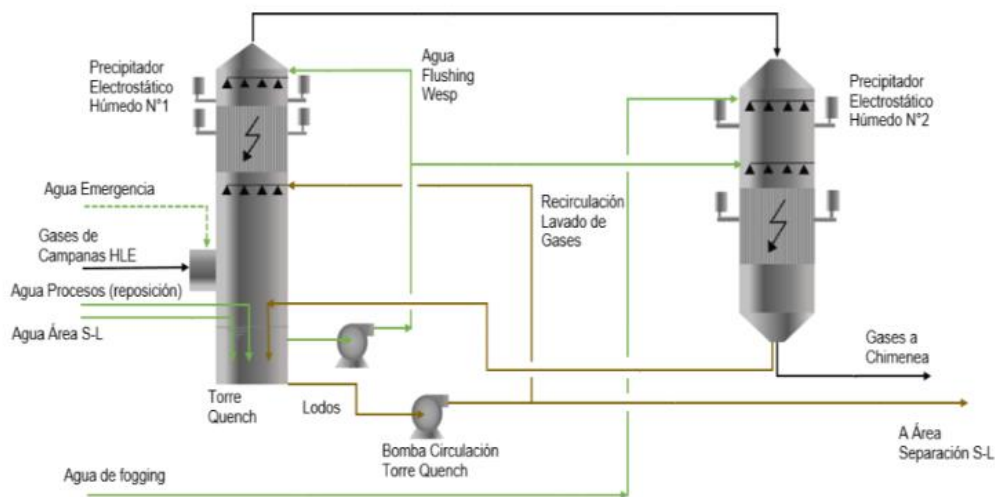


Ilustración 2.10: Esquema de Wesp1 y Wesp2 con bombas asociadas

2.4.1.3. Suministro de agua de procesos y agua de emergencia

Esta área tiene por objetivo principal abastecer ambas plantas de tratamiento, con el agua necesaria para hacer posible todas las operaciones en los distintos sectores. También administra el agua de emergencia requerida para mantener la integridad de las plantas de tratamiento de gases (ver ilustración 2.11).

2.4.1.3.1. Circuito de suministro de agua de procesos

La alimentación de agua desde el estanque de agua de reposición (o estanque de make up) de hornos de refinación y hornos de limpieza de escoria, de 20 [m³] c/u, se realiza utilizando una de las dos bombas de agua de reposición, quedando la otra en stand-by. El bombeo se realiza según necesidad por medio de control de nivel en la torre quench. De manera similar se realiza la alimentación de agua de make up a los hornos de limpieza de escoria desde el estanque de agua de reposición utilizando una de las dos bombas de agua de reposición. En ambos casos, la alimentación de agua de procesos es realizada de forma on/off, a flujo constante, siendo accionada o detenida por medio de un lazo de control de nivel, en las respectivas torres quench.

2.4.1.3.2. Circuito de suministro de agua de emergencia

El agua de emergencia será utilizada ante interrupciones del suministro de agua de lavado de gases en alguna o ambas PTG's, la cual es conocida como "Condición Especiales de Operación", tema que será tratado en el Anexo G.

El suministro de agua de emergencia se realizará desde los estanques de agua de reposición de hornos de refinación y de hornos de limpieza de escoria, los cuales cuentan con un volumen reservado de 5,5 [m³] para dicha aplicación en cada una de las plantas.

En caso de que las plantas de tratamiento de gases sufran pérdida de energía eléctrica en las bombas de lavado de la torre quench, abrirá automáticamente la válvula de agua de emergencia, ya sea para la torre de gases de hornos de refinación como para torre de gases de hornos de limpieza de escoria conduciendo el agua directamente a la torre quench y toberas, de la respectiva sección del precipitador.

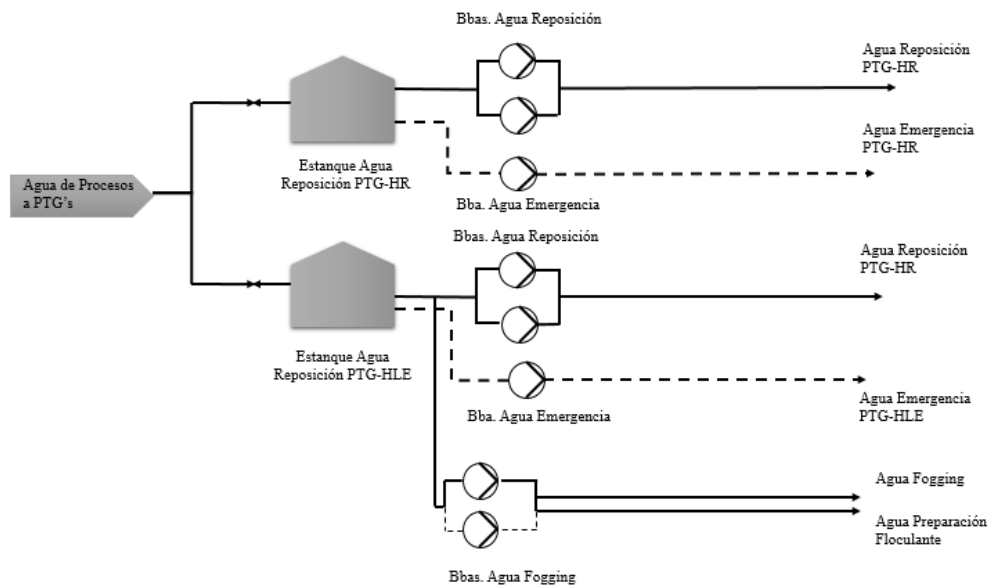


Ilustración 2.11: Esquema circuito de agua de reposición y emergencia.

2.4.2. Planta de separación sólido / líquido

Esta planta tiene por objetivo principal mantener la calidad del agua de lavado de gases y manejar la purga de efluentes sólidos y líquidos que se recirculan hacia fundición y planta de ácido, siendo realizado mediante el desvío de parte del agua de lavado de gases hacia esta área obteniendo como productos: agua clarificada que es recirculada a la torre quench de cada planta de tratamiento de gases de forma independiente, una purga final líquida que es enviada a la planta de ácido y un sólido filtrado con un grado de humedad <50%, que es enviado a fundición para ser utilizado como material circulante.

Su proceso puede ser separado en dos etapas:

2.4.2.1. **Etapas de clarificación de agua:**

En esta etapa, un caudal de agua de lavado de gases (alrededor de 6 [m³/h]) con un contenido de sólidos del orden de entre 2 y 5 [g/l], alimenta a los filtros separadores lamella de los hornos de refinación y hornos de limpieza de escoria, obteniéndose un clarificado entre 0,1 y 0,5 [g/l], y lodos con sólidos entre 1 y 4%. El agua de clarificado es recirculada a las torres

quench respectivas de cada planta de tratamiento de gases, mientras que los lodos contenidos en el fondo del filtro separador son enviados a los filtros prensa de cada sección.

2.4.2.2. Etapa de filtración de lodos

La filtración de lodos consiste en la deshidratación de los lodos provenientes de la etapa anterior de clarificación de agua, utilizando un equipo de filtración de prensa. Cabe señalar que, para la sección correspondiente a la planta de tratamiento de gases de hornos de refinación, existe un solo filtro prensa, mientras que para la de los hornos de limpieza de escorias existen dos, estando uno de ellos en stand-by.

El proceso de filtración comenzará cuando exista un nivel mínimo de lodos en el estanque de alimentación al filtro, impulsando los lodos mediante la bomba de efluentes hacia el filtro prensa. Al comenzar, el líquido filtrado será turbio hasta que se forme una capa sólida en el interior del filtro. El líquido será recirculado nuevamente hacia el estanque que alimenta el filtro hasta cuando el fluido sea claro, en este punto, será trasladado al estanque de traspaso de efluentes.

Al término del ciclo de filtración, se descargará el sólido compactado y se acopiará para ser llevado a la fundición.

Cuando se tenga suficiente nivel de efluente en el estanque de traspaso de efluentes, se procederá con su transporte hacia la Planta de Ácido mediante dos bombas de fluentes filtrados, existiendo una tercera en stand-by.

2.4.3. Secado de concentrado, secador Kumera

El propósito del secador de vapor rotatorio es secar el concentrado húmedo a un nivel de humedad requerido para que el concentrado no solo se transporte con transporte neumático, sino que también se procese eficientemente en el Horno Flash.

2.4.3.1. Área secador a vapor

Comprende el transporte del concentrado húmedo hasta el secador a vapor, y el secado del mismo. El concentrado húmedo es transportado, desde los silos de almacenamiento de materias primas, hacia el secador a vapor Kumera, a través de un sistema de correas transportadoras.

El secado se realiza en un secador rotario, donde el concentrado ingresa con una humedad aproximada de 11% en peso, y se obtiene un concentrado seco que alcanza un valor de 0,2% de humedad, apto para su fusión en el Horno Flash.

2.4.3.2. Área manejo de vahos

Debido al secado del concentrado, el agua evaporada es retirada del secador por medio de una corriente de aire de barrido, denominada como “vahos de secado”. Estos son enviados al filtro de mangas del secador para recuperar el polvo arrastrado antes de liberar los vahos finalmente a la atmósfera.

2.4.3.3. Área manejo de condensados

Los condensados generados durante el proceso de secado (generados por la transferencia de calor entre el vapor y el concentrado húmedo), son descargados del secador y alimentados al estanque de condensados en el cual se realiza el “flasheo” del mismo, para reducir su presión, generando vapor y condensado de baja presión. El vapor es enviado a condensadores mientras que el condensado de baja presión es enviado al estanque general de condensado.

2.4.3.4. Área sistema de transporte neumático

El concentrado, una vez procesado en el secador a vapor, es enviado a los vasos presurizados que impulsan el concentrado seco hacia la tolva de almacenamiento (T-400) por medio de un sistema de transporte neumático, protegido por un flujo de nitrógeno.

3. Capítulo III: Estado de arte

3.1. Mantenimiento

3.1.1. El concepto de mantenimiento

Es un conjunto de acciones detrás de una gestión integral que tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad o preservación de activos en un cierto contexto. Para ello debe valerse de personal capacitado, recursos físicos, activos, controles y mecanismos de gestión para satisfacer los niveles de producción o servicio comprometido por la organización durante un periodo de tiempo establecido, cumpliendo a su vez con estándares de seguridad vigentes y sin incurrir en gastos que no hayan sido programados.

Dado lo anterior, los objetivos del mantenimiento pueden ser resumidos en:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallas sobre los activos.
- Disminuir la gravedad de las fallas que no pueden ser evitadas.
- Evitar detenciones no programadas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad de las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras.
- Reducir los costos.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los activos.

3.1.2. Evolución del mantenimiento

A lo largo de los años, el mantenimiento ha ido modificando su estructura. Esto va de la mano con los avances tecnológicos asociados a los activos que han ido surgiendo en el periodo mencionado; también se puede comentar, que está respondiendo a expectativas cambiantes, las cuales abarcan desde la toma de conciencia para evaluar el punto en que las fallas de los equipos afectan la seguridad y al medio ambiente, conciencia de la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, hasta la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la instalación y acotando el costo. [2].

Dado lo anterior es posible distinguir en 3 generaciones a lo largo del tiempo (ver Ilustración 3.1).

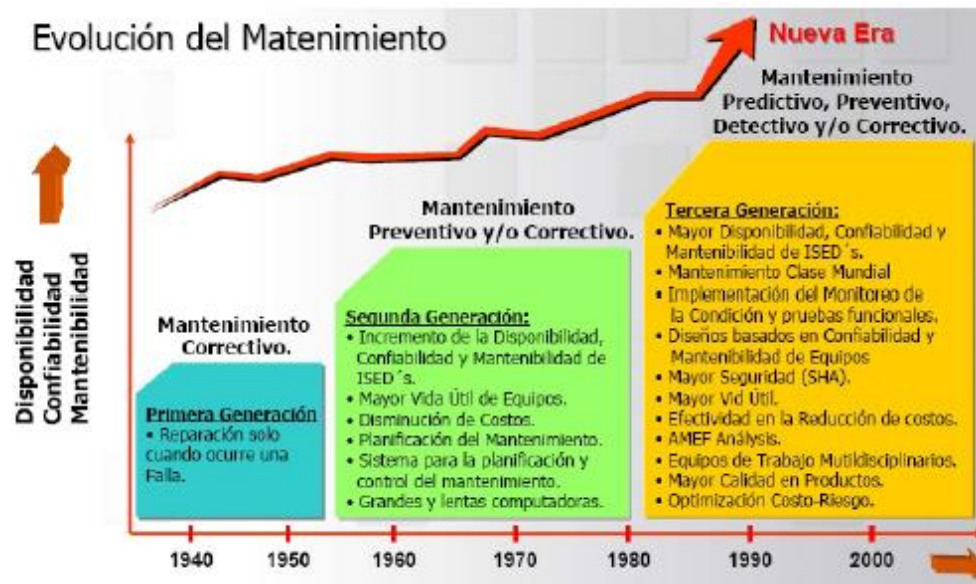


Ilustración 3.1: Evolución del mantenimiento [3].

3.1.3. Estrategias de mantenimiento

Conforme a lo anterior, se pueden agrupar en diferentes políticas de mantenimiento. De ellas, las más utilizadas en la actualidad son:

3.1.3.1. Correctivas

Comprende la sustitución de elemento por falla. Se clasifica en:

- No planificado: Es el mantenimiento de emergencia. Es aquel que debe realizarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o una condición imperativa que requiere ser satisfecha.
- Planificado: Es aquel en donde se sabe con antelación que es lo que debe hacerse, de modo que cuando se detenga el equipo para efectuar la reparación se disponga de personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

3.1.3.2. Preventivas

Consiste en la sustitución de elementos antes de fallas. Esta Política cubre todo el mantenimiento planificado y programado que se realiza con el fin de:

- Prevenir las fallas. Se conoce como mantenimiento preventivo directo o periódico (mantenimiento basada en el tiempo calendario o de operación de equipos), por cuanto sus actividades están controladas por el tiempo. Se basa en la confiabilidad de los equipos sin considerar las peculiaridades de una instalación dada.
- Detectar las fallas antes que se desarrollen en una rotura u otras interferencias en producción. Está basada en inspecciones, medidas y control de nivel de condición de los equipos. También conocido como mantenimiento basado en condición.

3.1.3.3. Predictivas

Corresponde a la sustitución de elementos tras síntomas. Es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de forma tal que dicho componente pueda reemplazarse justo antes de que falle.

3.2. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis se deben definir un alcance y propósitos para el análisis, establecer criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas, objeto del análisis.

3.2.1. Descripción de la metodología de análisis de criticidad

Para lograr determinar el nivel de criticidad de una unidad o equipo se debe utilizar una matriz de probabilidad por consecuencia de la falla.

Uno de los ejes se representa la probabilidad de que suceda la falla y el otro las consecuencias que producirá el que la falla se manifieste.

Tabla 3.1: Matriz de criticidad simplificada.

Consecuencia		1	2	3	4	5
Probabilidad	5	11	16	20	23	25
	4	7	12	17	21	24
	3	4	8	13	18	22
	2	2	5	9	14	19
	1	1	3	6	10	15

Esta matriz tiene un código de colores que permiten identificar de menor a mayor intensidad de riesgo, relacionado con el valor de criticidad del equipo o sistema (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Categoría y nivel de riesgo de la matriz.

Categoría de Riesgo	Nivel de Riesgo	Guías para la Matriz de Riesgos
21 a 25	(A)	Eliminar, evitar, implementar un plan de acción específico / procedimiento para administrar y monitorear
13 a 20	(B)	Administrar preventivamente
6 a 12	(B)	Administrar permanentemente (mantener siempre bajo control)
1 a 5	(C)	Monitorear y administrar apropiadamente

3.2.2. Secuencia del análisis de criticidad

1. Se define los niveles en donde se efectuará el análisis: instalación, sistema, equipo o elemento, según los requerimientos para jerarquizar los activos.
2. Realizar una estimación de probabilidad de falla y la consecuencia de la falla, siendo contrastada con valores establecidos previamente. La Tabla 3.3 muestra los criterios para estimar la frecuencia:

Tabla 3.3: Probabilidad de falla de la matriz.

Probabilidad		Ejemplo de evento
5	(Casi seguro Ocurre)	El incidente ocurre con frecuencia; del orden de uno o más por año o es probable que ocurra dentro del año
4	(Probable)	El incidente ocurrió pocas veces; menos de uno por año o es probable que ocurra dentro de los 5 años
3	(Posible)	El incidente ocurrió pocas veces; menos de un por año o es probable que ocurra dentro de los 5 años
2	(Improbable)	El incidente ocurrió alguna vez en el pasado; o puede ocurrir en los próximos 20 años
1	(Raro)	El incidente nunca ha ocurrido y es muy poco probable que ocurra en los próximos 20 años

Para la estimación de las consecuencias de la falla, se emplean los criterios establecidos a continuación:

Tabla 3.4: Consecuencias y tipo de pérdidas de la matriz.

Consecuencias					
Tipos de pérdida	1 Insignificante	2 Menor	3 Moderado	4 Mayor	5 Catastrófico
Daño a personas (seguridad/social)	Primeros auxilios/Exposición menor a riesgos para la salud	Tratamiento médico /exposición mayor a riesgo para la salud	Lesión con tiempo perdido/impacto reversible para la salud	Fatalidad simple o pérdida de calidad de vida	Múltiples Fatalidades / Impacto para la salud con consecuencias de muerte
Impacto ambiental	Daño mínimo al ambiente	Daño al medio ambiente / remediable a corto plazo	Serio daño al medio ambiente / Remediable en la vida de la operación	Daño mayor al medio ambiente / remediable posterior a la vida de la operación	Daño extremo al medio ambiente / irreversible
Pérdida Operacional/material	Sin interrupción de la operación	Breve interrupción de la operación	Detención parcial	Pérdida parcial de la operación	Pérdida total de la operación
Interrupción del negocio, daño material	US\$ 20k a US\$ 100k	US\$ 100k a US\$ 1,0M	US\$ 1,0M a US\$ 10,0M	US\$ 10,0M a US\$ 75,0M	Superior a US\$ 75,0M
Pérdida Operacional, daños que comprometen un proceso	Menor a US\$ 16k	US\$ 16k a US\$ 160k	US\$ 160k a US\$ 1,6M	US\$ 1,6M a US\$ 16,0M	Superior a US\$ 16,0M
Legal y regulatorio	Suceso de bajo Impacto Legal	Suceso Legal Menor, No conformidad e infracción a la ley	Infracción seria a la Ley: investigación/reporte por autoridades, posibles acciones judiciales y/o sanción	Infracción mayor a la ley: acciones judiciales y sanciones legales considerables	Acciones judiciales y sanciones legales muy considerables. Múltiples juicios legales y presidio
Impacto reputacional	Impacto leve. Puede ser de conocimiento público, pero sin preocupación pública	Impacto limitado. Preocupación pública local	Impacto considerable. Preocupación pública regional	Impacto nacional. Preocupación pública nacional	Impacto internacional. Atención pública internacional

3. Asignación de un nivel de criticidad, para ello se hace una correlación en donde se escoge el valor más alto de los tipos de pérdida asignada al activo y se hace coincidir con la casilla asignada para el nivel de probabilidad estimada, de esta forma se identifica el nivel de criticidad asociado al activo. Para visualizar la matriz de criticidad completa ver Anexo A.
4. Jerarquización de los activos según su nivel de criticidad, considerando de mayor importancia los críticos A y en menor medida los críticos C.

Cabe señalar que la matriz de riesgo usada como base es la matriz de riesgo estándar usada en Fundación Chagres. Se escogió usar esta matriz ya que abarca en totalidad la esencia de la metodología HSEC.

3.3. Metodología AMFEC

El AMFEC (*Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos*) nace bajo el alero de un mejoramiento continuo al interior de las empresas, por lo que se considera una metodología que permite identificar y evaluar las fallas potenciales a las cuales puede ser comprometido un proceso/equipo antes de que ocurran. A partir de un análisis de probabilidad de ocurrencia, formas de detección y el efecto que provocan; estas fallas se jerarquizan según su grado de impacto en la confiabilidad del proceso/equipo, para las cuales serán necesario generar acciones para erradicarlas o reducir su riesgo asociado.

El siguiente esquema refleja las actividades que deben ser realizadas para la conformación del AMFEC (ver Ilustración 3.2):

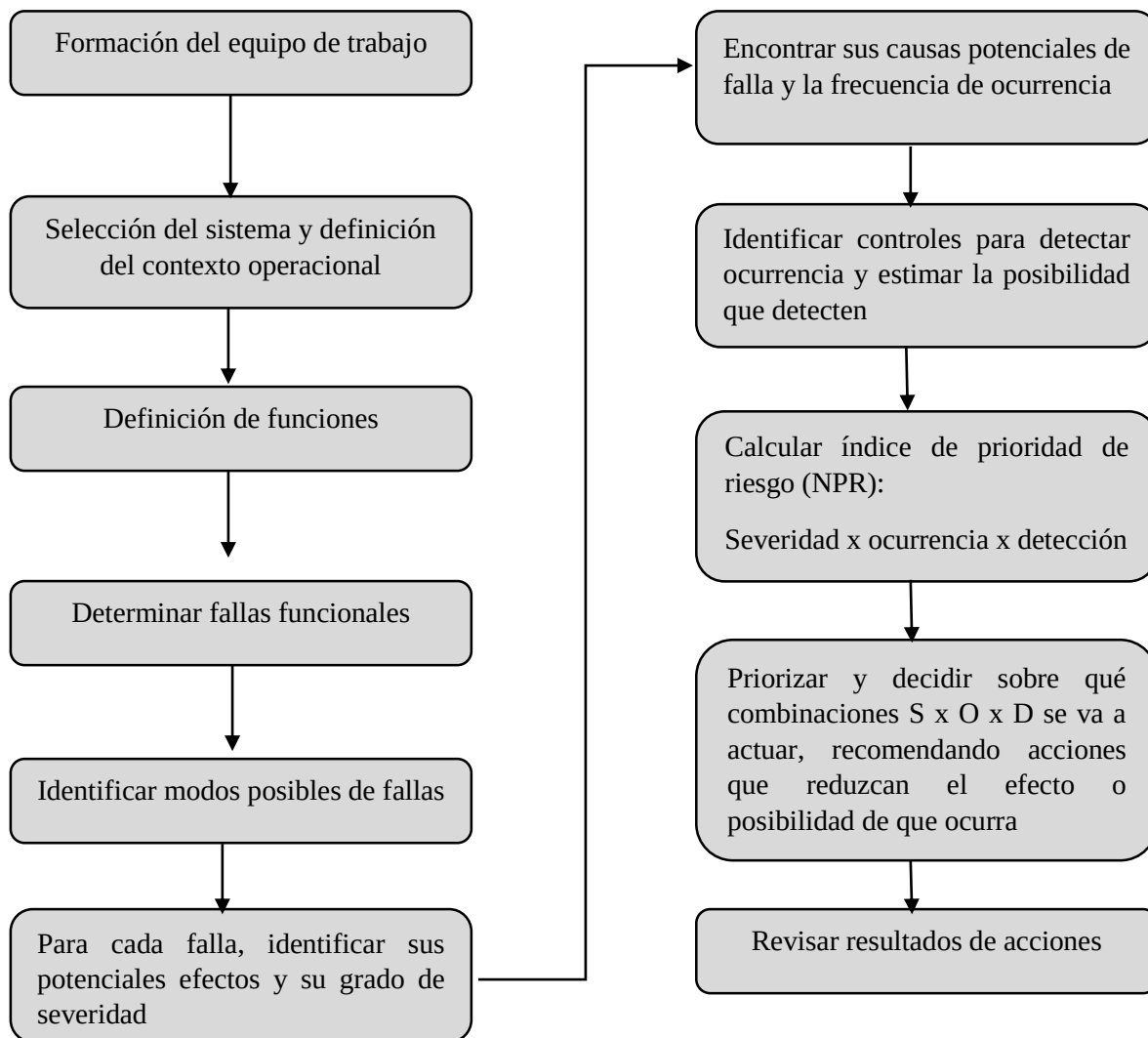


Ilustración 3.2: Esquema de conformación de AMFEC.

El AMFEC se realiza mediante una hoja estructurada que guía el análisis, por lo que, si se desea ver, revisar Anexo B.

Dado lo anterior se describen sus componentes:

3.3.1. Componente, Subsistema o Proceso:

Corresponde a la sección del equipo (o sistema) que se analizará. Esta sección, mediante su correcta ejecución, permite que el sistema mayor pueda cumplir con su función final, la cual es visible desde el análisis exterior.

3.3.2. Función:

Esta etapa consiste en definir la o las funciones que realizan los activos dentro de su contexto normal de funcionamiento. Apunta en definir claramente la funcionalidad específica que aporta el activo al sistema. Puede que un activo cumpla más de una función en el sistema.

3.3.3. Falla Funcional:

Una falla se define como la incapacidad de un activo para cumplir con su funcionamiento esperado; por ende, es suficiente con que un activo pierda eficiencia como para ser considerado en estado de falla. Cualquier alteración de la función previamente definida debe ser detallada en esta etapa.

3.3.4. Modo de Falla:

En este paso es donde comienza el análisis de modos de falla y efectos críticos (análisis AMFEC) propiamente tal. Consiste en identificar todos los eventos, factores o modos en que puede fallar la sección analizada, declarando un estado de falla en el equipo.

3.3.5. Efecto de la Falla:

Es la consecuencia generada por el modo de falla. Dentro de los efectos más recurrentes se destacan los que impliquen un tiempo de inactividad en el proceso o aquellos que inhabiliten el sistema por seguridad, etc.

La experiencia y conocimiento de los equipos; facilita en gran medida describir los posibles efectos de los modos de falla identificados.

3.3.6. Severidad:

Hace referencia al rango de gravedad asociado con el efecto más serio para un modo de falla dado dentro de un AMFEC individual, siendo evaluados en una escala del 1 al 10 por orden de menor a mayor gravedad (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5: Criterios y puntuaciones para la severidad del efecto de la falla.

Criterio de severidad	Puntuación
Severo, el fallo implica problemas de seguridad y regulaciones gubernamentales, el equipo no funciona (pérdida total de la función primaria)	10
Muy Alto, el equipo no opera (pérdida de la función primaria) pone en peligro el proceso	9-8
Alto, equipo sin respaldo opera pero con pérdida notoria de desempeño. Equipo con respaldo (equipo en stand-by) no opera pero el proceso no se detiene. (pérdida de la función primaria)	7-6
Moderado, el cliente nota el fallo, equipo opera pero con reducción en el nivel de desempeño	5-4
Bajo, molestia debido a apariencia o ruido audible, equipo sigue operando, percibido solo por parte de los clientes.	3-2
Muy Bajo, ningún efecto percibido por el cliente	1

3.3.7. Causa de la Falla:

Causa de la falla se entiende como la razón básica que provoca una falla.

Encontrar la causa de la falla es importante cuando se tiene en consideración lo siguiente:

- Equipos y sistemas en que el costo del mantenimiento correctivo no planificado es elevado.
- Cuando las fallas en los equipos o sistemas implican pérdidas de producción considerables.
- Equipos o sistemas que presentan fallas repetitivas que pueden ser consideradas crónicas.

- Análisis de errores humanos ya sea en ejecución o supervisión de los trabajos.

3.3.8. Ocurrencia:

Probabilidad de que una causa/mecanismo específico de una falla ocurra. El número o rango de probabilidad de ocurrencia tiene un significado relativo más que un valor absoluto.

La única forma de reducir este valor es previniendo o controlando las causas/mecanismos de una falla a través de cambios en el diseño o proceso.

Al igual que la Severidad, es evaluado en una escala de 1 a 10.

Tabla 3.6: Criterios y categorías de ocurrencia [5]

Criterio	Valor de Ocurrencia
Muy elevada probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente	10
Elevada probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentado frecuentemente en el pasado.	8-9
Frecuente probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia	6-7
Moderada probabilidad de ocurrencia. Defecto aparecido ocasionalmente	4-5
Escasa probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias pasadas similares	2-3
Muy escasa probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado	1

Cuando se asigna la clasificación por ocurrencia, deben ser consideradas dos posibilidades:

- La probabilidad de que se produzca la causa potencial de fallo. Para esto, deben evaluarse todos los controles actuales utilizados para prevenir que se produzca la causa de fallo en el elemento designado.
- La probabilidad de que, una vez ocurrida la causa de fallo, ésta provoque el efecto nocivo (modo de falla) indicado. Para este cálculo debe suponerse que la causa del fallo y de modo de fallo son detectados antes de que el producto llegue al cliente.

3.3.9. Controles Actuales:

En esta sección se describen controles cuya función puede ser prevenir que la causa de la falla ocurra o detectar que el modo o la causa de la falla ocurrió. Para ello hay dos formas de controles que se pueden considerar:

- Preventivos: elimina la posibilidad de que la causa o el modo de falla ocurra, o bien reduce la tasa de ocurrencia.
- Detección: identifica la ocurrencia de la causa o el modo de falla, de forma que es posible generar acciones correctivas o reactivas con antelación.

3.3.10. Detección:

Se trata de asignar un valor a la posibilidad de que los controles listados en la columna “controles de detección” detecten el modo de falla o su causa. Esta posibilidad se expresa en una escala inversa de 1 a 10. De esta manera, las clasificaciones más bajas son más preventivos que los clasificados con un número mayor (ver tabla 3.7)

Tabla 3.7: Criterios y categoría de detección.

Criterio	Puntuación	Detección
Actualmente no hay controles del proceso, no se puede detectar.	10	Casi imposible
No son detectables fácilmente, detectable por operador en estación de trabajo a través de sentidos (vista, olfato u oído).	9-8	Remota
El modo de falla se detecta en la estación de trabajo , mediante los instrumentos de mediciones continuas, o panel de control del equipo.	7-6	Baja
El modo de falla se detecta en la estación de control del operador de terreno mediante instrumentos de medición continua o controles automáticos.	5-4	Moderada
El modo de falla se detecta en la estación de control por controles automáticos que identifican las partes comprometidas y avisan a la consola de control .	3-2	Alta
Se previene la causa de la falla. No hay partes comprometidas por que tiene un diseño a prueba de errores.	1	Casi Segura

3.3.11. Responsabilidad:

Registrar el nombre de la organización y a los individuos responsables de cada una de las acciones recomendadas.

3.3.12. NPR:

Corresponde al Número de Prioridad del Riesgo (NPR), el cual es usado para ayudar a priorizar las labores de mantenimiento.

Es calculado en base a:

$$\text{NPR} = \text{Severidad (S)} \times \text{Ocurrencia (O)} \times \text{Detección (D)}$$

Para ello se puede tomar como guía la Tabla 3.8 a la hora de evaluar el activo en base a su NPR asociado.

Tabla 3.8: Línea directriz para NPR.

Rango NPR	Línea directriz
1 < NPR < 18	Riesgo menor del producto y/o del negocio
18 < NPR < 64	Riesgo moderado: Esto requiere una validación del producto y evaluación del diseño y/o caracterización del proceso para reducir el NPR medido
64 < NPR	Riesgo mayor/principal. Requiere revisión detalladas de diseño y/o proceso a fin de reducir el NPR medido

El NPR puede tomar valores de 1 a 1000, y se calcula para cada una de las líneas del formato generadas por la correspondencia de Efecto-Causa-Controles. En este punto es importante analizar previamente los datos obtenidos en Severidad, Ocurrencia y no centrarse netamente en un umbral de NPR.

Dado lo anterior se considerará sólo los valores de severidad ≥ 8 y NPR > 64 .

3.4. Teoría de la confiabilidad

La confiabilidad es una filosofía de gestión que busca resolver las nuevas dificultades, correspondientes al enorme aumento en cantidad y variedad de activos físicos que deben ser mantenidos, nuevas tecnologías con diseños más complejos de equipos y procesos, y gestión de fallas las cuales provocan elevados costos globales.

“El tiempo de detención de máquina afecta la capacidad de producción de los activos físicos al reducir la producción, aumentan los costos operacionales, y afectar el servicio al cliente”
[2]

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario comprender el contexto sobre el cual están involucrados los equipos, para poder tener una dimensión de lo que implicaría una falla de un equipo o sistema en particular, dentro del área de trabajo.

3.4.1. Conceptos de confiabilidad

Para poder iniciar un análisis de confiabilidad es necesario definir que es confiabilidad y los conceptos detrás de ella.

Se entiende por **Función de confiabilidad** $R(t)$: la probabilidad de que un elemento va a funcionar a un nivel de uso (o tipo), sin fallar, durante un tiempo determinado y bajo condiciones preestablecidas [13].

La **Función densidad de falla** $f(t)$ o **Función de densidad probabilística de falla**, representa la probabilidad de que un componente o sistema falle en un instante de tiempo t cualquiera. Además, la **Función de distribución acumulada de falla** $F(t)$ representa la probabilidad que el equipo o sistema falle en el intervalo de tiempo desde que comenzó a operar hasta un tiempo t . Por lo que la relación entre la función de falla y la probabilidad acumulada de falla es:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1)$$

En la Ilustración 3.3 se puede apreciar de manera gráfica la formula (1). Además de esta misma se puede inferir que la confiabilidad puede ser expresada como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - F(t) \quad (2)$$

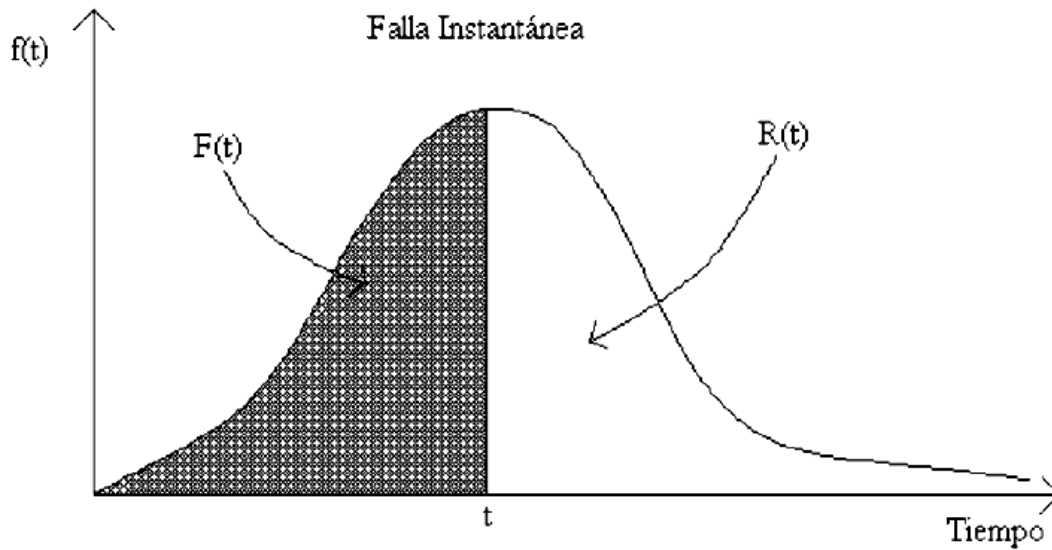


Ilustración 3.3: Representación de la función de densidad de falla.

La confiabilidad puede ser traducida a través de modelos de probabilidad, el tipo de modelo dependerá de la etapa de vida en que se encuentre el equipo, elemento o componente. La Ilustración 3.4 ilustra las distintas fases en la vida de los equipos, elementos o componentes

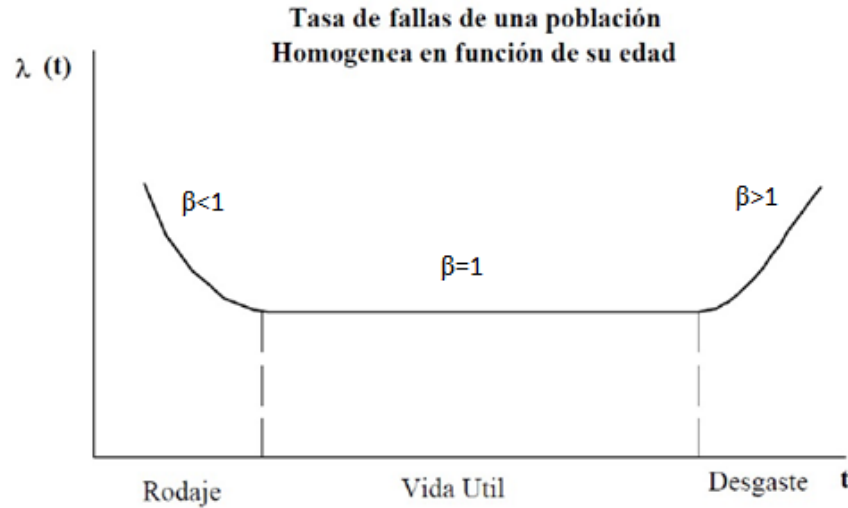


Ilustración 3.4: Tasa de falla o Curva de la bañera.

En donde **Tasa de falla** $\lambda(t)$ se define como: probabilidad de tener una falla del sistema o del elemento entre los instantes t y $(t + \Delta t)$ a condición de que el sistema haya sobrevivido hasta el tiempo “ t ”, siendo expresada como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

En la Ilustración 3.4 se puede observar la forma característica de esta función a lo largo de la vida útil del equipo, la cual puede ser identificada en 3 periodos:

- I. Rodaje (o mortalidad infantil): son fallas que se deben normalmente a defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados, mantenimientos incorrectos, calidad deficiente en elementos y repuestos, etc.
- II. Vida útil (o madurez): las fallas son originadas básicamente por operaciones indebidas en los equipos, sobrecarga en la capacidad de producción cambios constantes en las condiciones de funcionamiento, etc.
- III. Desgaste (o envejecimiento): las fallas son causadas por el desgaste de los elementos, envejecimiento o pérdida de funcionalidad. Esto se debe a las inclemencias del entorno, el exceso de uso, desuso o abuso

Otro indicador importante es el **Tiempo medio entre fallas** o **MTBF** (Mean Time Between Failures), el cual refleja el tiempo comprendido entre el instante en que el elemento entra (o

vuelve a entrar) en servicio (una vez finalizado el mantenimiento) hasta que se presenta la falla.

3.4.2. Distribución de Weibull

La distribución Weibull es una distribución de probabilidad continua y multiparamétrica que resulta ser muy versátil ya que permite modelar, mediante 2 o 3 parámetros, las diferentes etapas del ciclo de vida de un equipo (rodaje, vida útil y desgaste). En la teoría de la confiabilidad es una de las más utilizadas por las prestaciones que brinda en relación a los parámetros.

Mediante la utilización de la distribución de Weibull, es posible modificar las fórmulas (1), (2) y (3), quedando:

Función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Función de distribución acumulada de falla:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Función de densidad de falla:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

Tasa de falla:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (7)$$

Tiempo medio entre fallas (MTBF):

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (8)$$

Dado lo anterior, se definen los parámetros:

- β : parámetro de forma, que controla la forma de la distribución.
Este parámetro puede adquirir valores que son reflejados en la posición de la tasa de falla, ver Ilustración 3.4:
 - Para valores de $\beta < 1$, $\lambda(t)$ decrece en el tiempo, coincidiendo con la etapa de rodaje.
 - Para valores de $\beta = 1$, $\lambda(t)$ permanece constante, representando la vida útil del equipo.
 - Para valores de $\beta > 1$, $\lambda(t)$ es creciente, demostrando una etapa de desgaste.
- η : parámetro de escala muestra el alargamiento de la distribución en el eje del tiempo.
- γ : parámetro de localización, es expresada en las mismas unidades de t y define el punto de partida o el origen de la distribución.
- Γ es la función Gamma.
- t : tiempo de buen funcionamiento.

3.4.2.1. Determinación de los parámetros de Weibull

Para poder obtener los parámetros de Weibull (γ , β y η) se utilizará el método de los mínimos cuadrados. Mediante la transformación doble logarítmica de la Función de distribución acumulada de falla:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

$$1 - F(t) = \frac{1}{e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (11)$$

Aplicando logaritmo natural a la expresión se obtiene:

$$\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] = \ln \left[e^{\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \right] \quad (12)$$

Por lo tanto:

$$\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] = \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \quad (13)$$

Aplicando nuevamente logaritmo natural a ambos lados resulta:

$$\ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \cdot \ln \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right) \quad (14)$$

$$\ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \cdot \ln(t - \gamma) - \beta \cdot \ln(\eta) \quad (15)$$

Que corresponde con la ecuación de una recta en la forma $y=mx+b$, siendo:

$$y = \ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] \quad (16)$$

$$x = \ln(t - \gamma) \quad (17)$$

$$b = \beta \cdot \ln(\eta) \quad (18)$$

Podremos así definir el que β (parámetro de forma) es la pendiente de la recta de regresión, desde donde además es posible obtener el parámetro de escala tal como sigue:

$$b = \beta \cdot \ln(\eta) \Rightarrow e^{\frac{-b}{\beta}} = \eta \quad (19)$$

Para poder trazar la recta de regresión es necesario utilizar un estimador de la función de distribución acumulada (9), la cual se logra mediante la implementación del método de rango de mediana, el cual es un estimador no paramétrico basado en el orden de las fallas, que asigna una probabilidad de ocurrencia de fallo a un intervalo determinado.

La expresión de este estimador es la siguiente:

$$w_a(x_i) = \frac{\frac{i}{n-i+1}}{\frac{i}{n-i+1} + F_{1-\alpha, 2(n-i+1), 2i}} \quad (20)$$

Donde:

- $W_a(x_i)$: es el rango de mediana para un nivel de confianza $1-\alpha$, donde α es el nivel de significancia que toma valor 0,5.
- I : orden de la falla.
- n : número total de datos de la muestra.
- F_{α, v_1, v_2} : valor crítico de la distribución F, evaluada en el nivel de significancia α y con grados de libertad v_1 y v_2 .

Dada la complejidad de (20) se utilizará la expresión aproximada de Bernard, la cual tiene la forma de:

$$RM(x_i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \approx F(x_i) \quad (21)$$

Donde:

$RM(x_i)$: Rango de mediana.

i : Orden de falla.

N : Número de total de datos de la muestra.

3.4.2.2. Aplicación del método

Para poder obtener los parámetros de Weibull, mostrados en la sección 3.4.2.1., será utilizado el programa Excel, en conjunto con el listado expuesto en el Anexo C, el cual contiene el listado de fallas en orden cronológico de los equipos. Como se apreciará posteriormente no se dispone de intervalos de tiempos de falla regulares, por lo que el método necesita que la muestra de datos sea organizada en forma ascendente.

Una vez enlistado las fallas, se procede a calcular mediante el método de rango de mediana aproximado de Bernard (21), obteniéndose así una estimación válida de la Función de distribución acumulada de falla. Posteriormente se calculan los valores de la recta x (17) e y

(16), los cuales permitirán a su vez obtener los valores de la pendiente β y la intersección b utilizando la función PENDIENTE(conocido_y; conocido_x) y INTERSECCION.EJE(conocido_y;conocido_x).

Para poder validar la regresión lineal, se calcula el coeficiente de correlación, mediante la fórmula PEARSON(matriz1; matriz2). El valor entregado por esta fórmula indica que, mientras más cerca del valor 1 se encuentre, los puntos se encuentran más cerca a la recta generada, lo que valida el cálculo.

Cabe señalar que para efectos de cálculos, se considerará el parámetro γ con valor 0.

4. Capítulo IV: Desarrollo de la estrategia

4.1. Listado de equipos

Para poder reconocer los equipos, es necesario seccionarlos y catalogarlos previamente según su área y proceso respectivo junto a su Tag Asociado, para ello se elaboran las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1: Tag de los equipos en planta de tratamiento de gases de hornos de refinación

Planta de tratamiento de gases – hornos de refinación		
Proceso	Nombre de equipo	Tag asociado
Manejo y transporte de gases	Ventilador de tiro inducido (VTI-HR)	7124 - 1840 - 001
	Precipitador electrostático húmedo (Wesp)	7122 - 2204 - 001
Tratamiento de gases	Bomba flushing HR	7127 - 1550 - 004
	Bomba recirculación N°1 HR	7127 - 1550 - 001
	Bomba recirculación N°2 HR	7127 - 1550 - 002
	Bomba recirculación N°3 HR	7127 - 1550 - 003

Tabla 4.2: Tag de los equipos en planta de tratamiento de gases de hornos de limpieza de escoria.

Planta de tratamiento de gases – hornos de limpieza de escoria		
Proceso	Nombre de equipo	Tag asociado
Manejo y transporte de gases	Ventilación de tiro inducido (VTI-HLE)	7224 - 1840 - 001
Tratamiento de gases	Precipitador electrostático húmedo N°1 (Wesp1)	7222 - 2204 - 001
	Precipitador electrostático húmedo N°2 (Wesp2)	7223 - 2204 - 001
	Bomba flushing HLE	7227 - 1550 - 004
	Bomba recirculación N°1 HLE	7227 - 1550 - 001
	Bomba recirculación N°2 HLE	7227 - 1550 - 002
	Bomba recirculación N°3 HLE	7227 - 1550 - 003

Tabla 4.3: Tag de los equipos en suministro de agua de proceso y agua de emergencia.

Suministro de agua de proceso y agua de emergencia		
	Nombre de equipo	Tag asociado
HR	Estanque agua reposición PTG-HR	7141 - 1910 - 001
	Bomba agua reposición n°1	7141 - 1550 - 001
	Bomba agua reposición n°2	7141 - 1550 - 002
	Bomba agua reposición n°3 [Emergencia]	7141 - 1550 - 003
HLE	Estanque agua reposición PTG-HLE	7241 - 1910 - 001
	Bomba agua reposición n°1	7241 - 1550 - 001
	Bomba agua reposición n°2	7241 - 1550 - 002
	Bomba agua reposición n°3 [Emergencia]	7241 - 1550 - 003
	Bomba agua reposición n°4 [Fogging]	7241 - 1550 - 004
	Bomba agua reposición n°5 [Fogging]	7241 - 1550 - 005

4.2. Listado de equipos y criticidad asociada

En base a la aplicación de la matriz de criticidad se pudo asignar un nivel de criticidad a los equipos de las plantas de tratamiento de gases en estudio, quedando reflejadas en las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6.

Tabla 4.4: Equipos PTG-HR con criticidad asociada.

Planta de tratamiento de gases – hornos de refinación									
Proceso	Nombre de Equipo	S/SO	IA	In/Dm	L y R	R/S/C	Probabilidad	Criticidad	
Manejo y transporte de gases	Ventilador de tiro inducido	1	2	3	1	1	3	13	CB
Tratamiento de gases	Precipitador electrostático húmedo (Wesp)	1	2	2	4	2	4	17	CB
	Bomba flushing	1	2	1	1	1	4	12	CB
	Bomba recirculación N°1	1	1	1	1	1	3	4	CC
	Bomba recirculación N°2	1	1	1	1	1	3	4	CC
	Bomba recirculación N°3	1	1	1	1	1	3	4	CC

Tabla 4.5: Equipos PTG-HLE con criticidad asociada.

Planta de tratamiento de gases – hornos de limpieza de escoria									
Proceso	Nombre de equipo	S/SO	IA	In/Dm	L y R	R/S/C	Probabilidad	Criticidad	
Manejo y transporte de gases	Ventilación de tiro inducido	1	2	3	1	1	3	13	CB
Tratamiento de gases	Precipitador electrostático húmedo N°1 (Wesp 1)	1	2	1	3	2	3	13	CB
	Precipitador electrostático N°2 (Wesp 2)	1	1	2	3	2	3	13	CB
	Bomba flushing	1	2	1	1	1	3	8	CB
	Bomba recirculación N°1	1	1	1	1	1	3	4	CC
	Bomba recirculación N°2	1	1	1	1	1	3	4	CC
	Bomba recirculación N°3	1	1	1	1	1	3	4	CC

Tabla 4.6: Tabla de equipos de suministro de agua de procesos y agua de emergencia con criticidad asociada.

Suministro de agua de proceso y agua de emergencia									
Proceso	Nombre de equipo	S/SO	IA	In/D	L y R	R/S/C	Probabilidad	Criticidad	
Suministro de agua de proceso y agua de emergencia	Estanque agua reposición PTG-HR	1	1	1	1	1	3	4	CC
	Estanque agua reposición PTG-HLE	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°1 (HR)	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°2 (HR)	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°3 (HR) [E]	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°1 (HLE)	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°2 (HLE)	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°3 (HLE) [E]	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°4 (HLE) [F]	1	1	1	1	1	2	2	CC
	Bomba agua reposición n°5 (HLE) [F]	1	1	1	1	1	2	2	CC

Para el caso en estudio y aplicación de la estrategia se tomará en cuenta los equipos con criticidad **B**, debido a que:

- Poseen cierta capacidad para poner las Plantas de Tratamiento de Gases en una situación inestable, de forma que afectan el proceso y son de aplicación directa sobre la normativa ambiental dispuesta por el DS 28/2013.
- Los críticos C, son equipos que poseen respaldo, por lo que es posible sustituirlos en caso de que fallen.

4.3. Confiabilidad de los equipos críticos B

Para poder obtener los datos de Confiabilidad de los equipos es necesario estimar los parámetros de Weibull. Para ello se comienza con el levantamiento de datos mediante el uso de la plataforma Ellipse (Sistema de información administrativo de mantenimiento) que ocupaba Fundación Chagres, hasta el día 9/10/2018 (fecha límite que se consideró en el desarrollo del cálculo para término de la evaluación de confiabilidad y que coincide con la mantención general de la fundición). En ella se registraron los fallos, detenciones programadas y no programadas a lo largo del periodo de evaluación de los equipos ver Anexo C. Al ser datos obtenidos de Ellipse, los cuales fueron ingresados por el personal de Anglo American, están sujetos a variabilidad en algunos campos, por ejemplo, en los tiempos.

Para mayor detalle del cálculo realizado revisar Anexo D.

Nota: Para el cálculo se consideró el mes de 30 días y 24 horas por día.

Nota n°2: algunos elementos son evaluados por el mecánico, pero fueron realizados por su criterio personal a pesar de no estar solicitado en las pautas. Frente a eso es mejor desglosar los tópicos y agregar elementos.

4.3.1. Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación (Wesp)

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.7: Parámetros de Weibull de Wesp.

β	0,888259184
η	4399,796909
γ	0
MTBF	4663,272748

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,888$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 4.663 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Anexo C, es posible modelar la función de confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación, quedando reflejadas en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla en Wesp respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,99028	0,00971	0,00036
72	0,97442	0,02557	0,00031
144	0,95317	0,04682	0,00029
216	0,93355	0,06644	0,00028
288	0,91505	0,08494	0,00027
360	0,89742	0,10257	0,00026
432	0,8805	0,11949	0,00026
504	0,86421	0,13578	0,00025
576	0,84848	0,15151	0,00025
648	0,83324	0,16675	0,00025

720	0,81846	0,18153	0,00024
792	0,8041	0,19589	0,00024
864	0,79014	0,20985	0,00024
936	0,77654	0,22345	0,00024
1008	0,76329	0,2367	0,00023
1080	0,75037	0,24962	0,00023
1152	0,73776	0,26223	0,00023
1224	0,72545	0,27454	0,00023
1296	0,71343	0,28656	0,00023
1398	0,69685	0,30314	0,00022
1440	0,69018	0,30981	0,00022
1512	0,67894	0,32105	0,00022
1584	0,66794	0,33205	0,00022
1656	0,65717	0,34282	0,00022
1728	0,64663	0,35336	0,00022
1800	0,6363	0,36369	0,00022
1872	0,62618	0,37381	0,00022
1944	0,61627	0,38372	0,00022
2016	0,60655	0,39344	0,00022
2088	0,59703	0,40296	0,00021
2160	0,58769	0,4123	0,00021

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración 4.1 y 4.2).

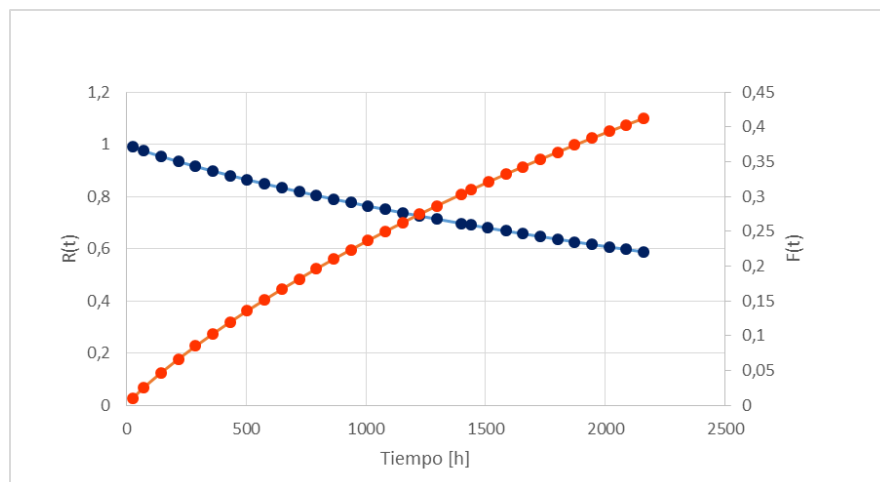


Ilustración 4.1: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en Wesp.

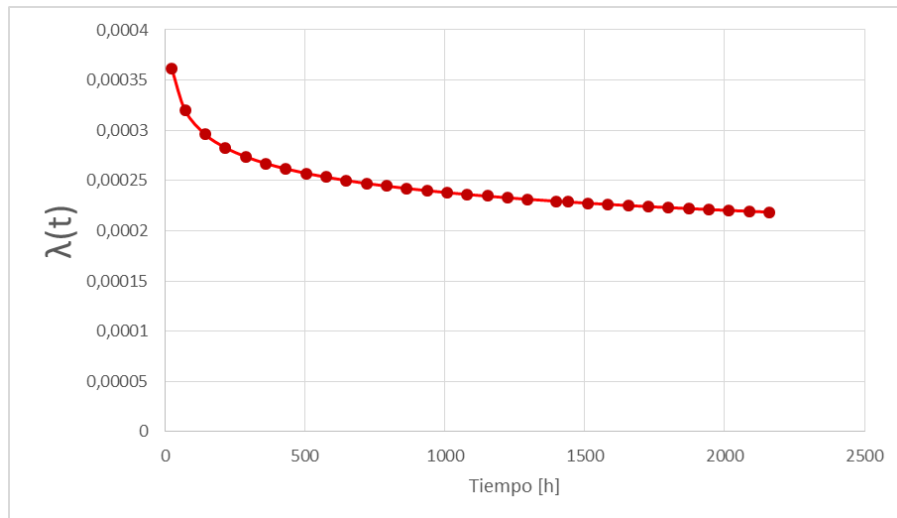


Ilustración 4.2: Tasa de falla vs tiempo en Wesp.

Como se puede observar en la Tabla 4.8, la confiabilidad del Wesp hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,81846**, lo cual refleja que el equipo llega con una excelente confiabilidad. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 81,9\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.1.1. Medidas correctivas

MPA 116 (*Mensual*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.

MPA 117 (*Semestral*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.
- Realizar inspección visual en ducto colector y de ser necesario realizar aspirado de material particulado acumulado.
- Realización de prueba de válvulas de corte de línea de lavado y recirculación.
- Revisión de soportes, electrodos descarga y de recolección por suciedad, corrosión, rotura y verificando su posición central.
- Revisión del estado de los gratings y pretil.

MPA 118 (*Bienal*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.
- Realizar inspección visual en ducto colector y de ser necesario realizar aspirado de material particulado acumulado.
- Realización de prueba de válvulas de corte de línea de lavado y recirculación.
- Revisión de soportes, electrodos descarga y de recolección por suciedad, corrosión, rotura y verificando su posición central.
- Revisión del estado de los gratings y pretil.

Recomendación:

- Creación de pautas de mantenimiento mecánico y eléctrico para damper de corte en ducto de gases de hornos de refinación.
- Cambiar válvulas de corte de línea de lavado y recirculación por una de material resistente al fluido de trabajo.

4.3.2. Precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria (Wesp 1)

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.9: Parámetros de Weibull de Wesp 1.

β	0,707975123
η	1.481,862054
γ	0
MTBF	1.855,856567

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,7079$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 1.855 [h], lo cual es un tiempo necesita ser mejorado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Anexo C, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación quedando reflejadas en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de Wesp 1 respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,94744	0,05255	0,00159
72	0,88912	0,11087	0,00115
144	0,82533	0,17466	0,00094
216	0,7743	0,22569	0,00083
288	0,73083	0,26916	0,00077
360	0,69264	0,30735	0,00072
432	0,65847	0,34152	0,00068
504	0,62749	0,3725	0,00065
576	0,59916	0,40083	0,00062
648	0,57305	0,42694	0,0006

720	0,54887	0,45112	0,00058
792	0,52636	0,47363	0,00057
864	0,50533	0,49466	0,00055
936	0,48561	0,51438	0,00054
1008	0,46708	0,53291	0,00053
1080	0,44962	0,55037	0,00052
1152	0,43312	0,56687	0,00051
1224	0,41752	0,58247	0,0005
1296	0,40273	0,59726	0,00049
1398	0,38304	0,61695	0,00048
1440	0,37534	0,62465	0,00048
1512	0,36263	0,63736	0,00047
1584	0,35052	0,64947	0,00046
1656	0,33897	0,66102	0,00046
1728	0,32793	0,67206	0,00045
1800	0,31739	0,6826	0,00045
1872	0,30729	0,6927	0,00044
1944	0,29763	0,70236	0,00044
2016	0,28837	0,71162	0,00043
2088	0,27949	0,7205	0,00043
2160	0,27097	0,72902	0,00042

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustraciones 4.3 y 4.4.)

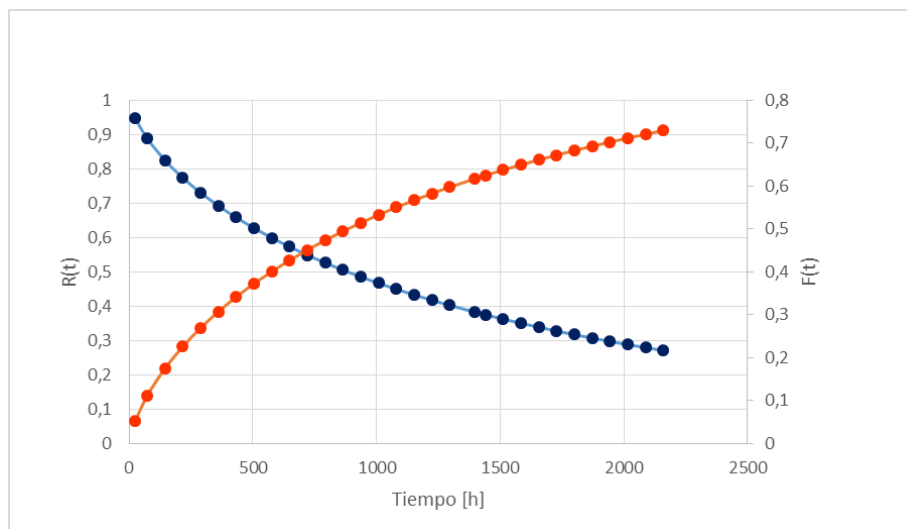


Ilustración 4.3: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de Wesp 1.

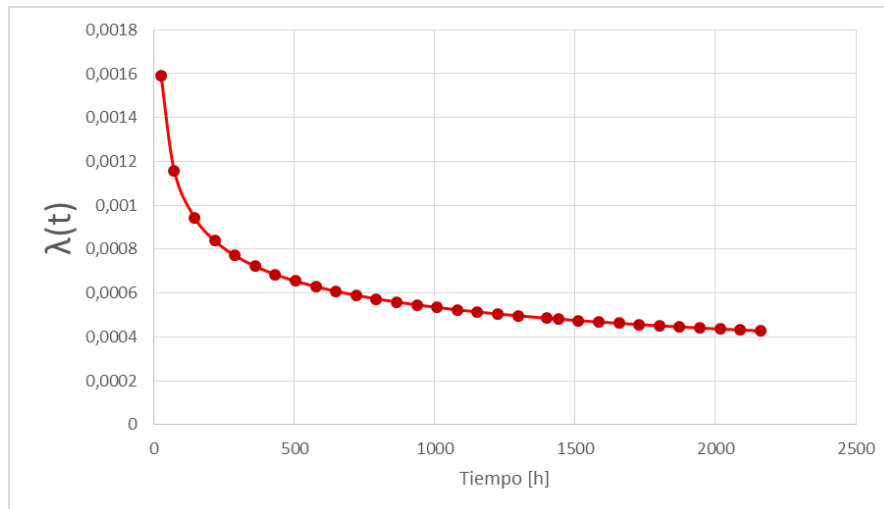


Ilustración 4.4: Tasa de falla vs tiempo de Wesp 1.

Como se puede observar en la Tabla 4.10, la confiabilidad del Wesp hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,54887** lo cual refleja que el equipo llega con una condición que necesita ser mejorada. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 54,9\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.2.1. Medidas correctivas

MPA 116 (*Mensual*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.

MPA 117 (*Semestral*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.
- Realizar inspección visual en ducto colector y de ser necesario realizar aspirado de material particulado acumulado.
- Realización de prueba de válvulas de corte de línea de lavado y recirculación.
- Revisión de soportes, electrodos descarga y de recolección por suciedad, corrosión, rotura y verificando su posición central.
- Revisión del estado de los gratings y pretil.

MPA 118 (*Bienal*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.
- Realizar inspección visual en ducto colector y de ser necesario realizar aspirado de material particulado acumulado.
- Realización de prueba de válvulas de corte de línea de lavado y recirculación.
- Revisión de soportes, electrodos descarga y de recolección por suciedad, corrosión, rotura y verificando su posición central.
- Revisión del estado de los gratings y pretil.

Recomendación:

- Creación de pautas de mantenimiento mecánico y eléctrico para damper de corte en ducto de gases de hornos de limpieza de escoria.
- Cambiar válvulas de corte de línea de lavado y recirculación por una de material resistente al fluido de trabajo.

4.3.3. Precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria (Wesp 2)

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.11: Parámetros de Weibull de Wesp 2.

β	0,833169191
η	3876,839059
γ	0
MTBF	4272,060682

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,8332$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 4.272 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla 4.11, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación, quedando reflejadas en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de Wesp 2 respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,98564	0,01435	0,0005
72	0,96453	0,03546	0,00041
144	0,93768	0,06231	0,00037
216	0,91375	0,08624	0,00034
288	0,8917	0,10829	0,00033
360	0,87105	0,12894	0,00031
432	0,85155	0,14844	0,0003
504	0,833	0,16699	0,0003
576	0,81528	0,18471	0,00029
648	0,79829	0,2017	0,00028

720	0,78196	0,21803	0,00028
792	0,76623	0,23376	0,00028
864	0,75104	0,24895	0,00027
936	0,73636	0,26363	0,00027
1008	0,72214	0,27785	0,00026
1080	0,70837	0,29162	0,00026
1152	0,695	0,30499	0,00026
1224	0,68203	0,31796	0,00026
1296	0,66941	0,33058	0,00025
1398	0,65214	0,34785	0,00025
1440	0,64521	0,35478	0,00025
1512	0,63359	0,3664	0,00025
1584	0,62226	0,37773	0,00024
1656	0,61123	0,38876	0,00024
1728	0,60046	0,39953	0,00024
1800	0,58996	0,41003	0,00024
1872	0,57971	0,42028	0,00024
1944	0,5697	0,43029	0,00024
2016	0,55992	0,44007	0,00023
2088	0,55037	0,44962	0,00023
2160	0,54103	0,45896	0,00023

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustraciones 4.5 y 4.6).

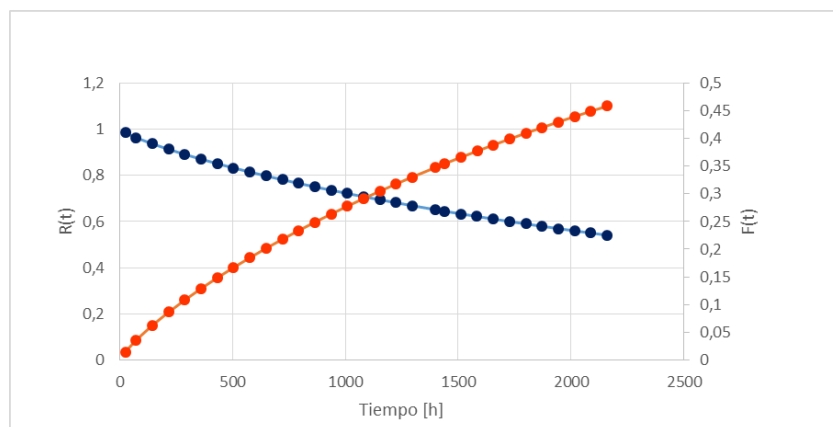


Ilustración 4.5: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en Wesp 2.

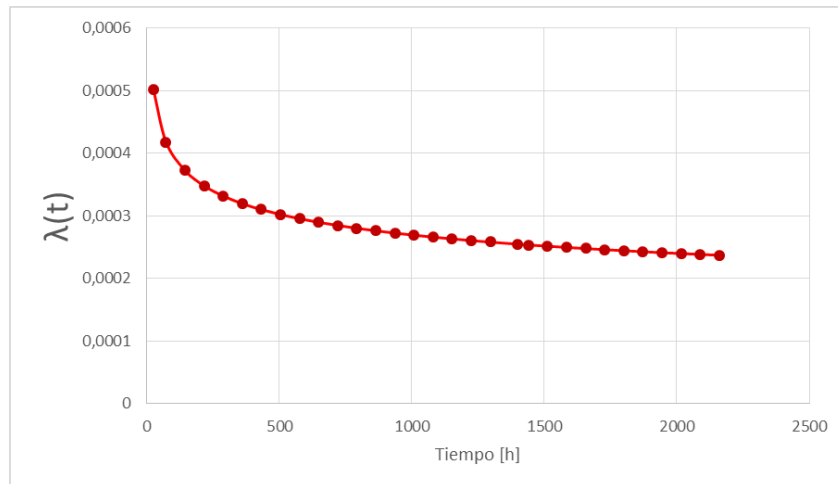


Ilustración 4.6: Tasa de falla vs tiempo en Wesp 2.

Como se puede observar en la Tabla 4.12, la confiabilidad del Wesp hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,78196** lo cual indica que el equipo llega con una excelente confiabilidad. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 78,2\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.3.1. Medidas correctivas

MPA 114 (*Mensual*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, recirculación y ducto de gases.

MPA 115 (*Semestral*)

- Revisión de uniones enflanchadas en admisión y descarga, incluyendo empaquetaduras, de líneas de lavado, línea de fogging y ducto de gases.
- Realizar inspección visual en ducto de gases Wesp 1 a Wesp 2 y de ser necesario realizar aspirado de material particulado acumulado.
- Realización de prueba de válvulas de corte de línea de lavado y fogging.
- Revisión de los electrodos de recolección por suciedad, corrosión y/o rotura.

4.3.4. Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.13: Parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación.

β	0,663246141
η	3.923,165532
γ	0
MTBF	5.243,744889

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,6632$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además su MTBF tiene un valor $\approx 5.243[h]$, lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla 4.13, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla 4.14).

Tabla 4.14: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,96653	0,03346	0,00094
72	0,93189	0,0681	0,00064
144	0,89431	0,10568	0,00051
216	0,86401	0,13598	0,00044
288	0,83786	0,16213	0,0004
360	0,81455	0,18544	0,00037
432	0,79336	0,20663	0,00035
504	0,77383	0,22616	0,00033
576	0,75567	0,24432	0,00032
648	0,73867	0,26132	0,00031
720	0,72265	0,27734	0,00029
792	0,70749	0,2925	0,00028

864	0,6931	0,30689	0,00028
936	0,67938	0,32061	0,00027
1008	0,66628	0,33371	0,00026
1080	0,65373	0,34626	0,00026
1152	0,64169	0,3583	0,00025
1224	0,63012	0,36987	0,00025
1296	0,61897	0,38102	0,00024
1398	0,60386	0,39613	0,00023
1440	0,59785	0,40214	0,00023
1512	0,58782	0,41217	0,00023
1584	0,57812	0,42187	0,00022
1656	0,56871	0,43128	0,00022
1728	0,5596	0,44039	0,00022
1800	0,55075	0,44924	0,00021
1872	0,54216	0,45783	0,00021
1944	0,53382	0,46617	0,00021
2016	0,5257	0,47429	0,00021
2088	0,5178	0,48219	0,0002
2160	0,51011	0,48988	0,0002

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustraciones 4.7 y 4.8).

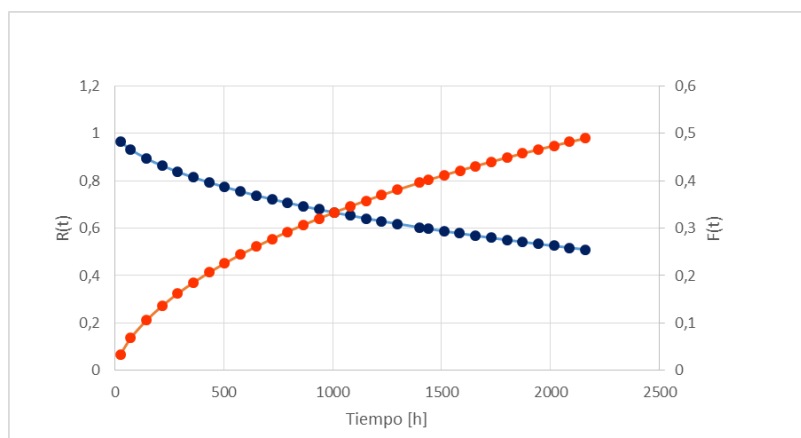


Ilustración 4.7: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación.

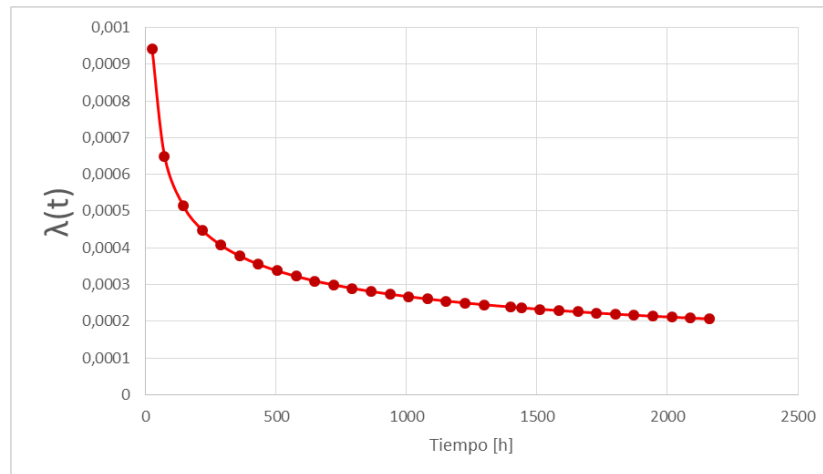


Ilustración 4.8: Tasa de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de refinación.

Como se puede observar en la Tabla 4.14, la confiabilidad del Wesp hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,72265** lo cual refleja que el equipo llega con una excelente condición. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 72,3\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.4.1. Medidas Correctivas

MPA 111 (*Anual*)

- Revisión del estado en la base de hormigón y base metálica.
- Revisión del estado de los absorbedores.
- Realizar lavado del rodete.

Recomendación

- Incorporar un sistema de purga de condensación para evitar que la condensación dañe la junta de expansión.

4.3.5. Ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.15: Parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.

B	0,854283989
η	2.984,386073
Υ	0
MTBF	3.236,760368

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,8543$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 3.236 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla 4.15, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla 4.16).

Tabla 4.16: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,98389	0,0161	0,00057
72	0,95933	0,04066	0,00049
144	0,92769	0,0723	0,00044
216	0,89932	0,10067	0,00041
288	0,87312	0,12687	0,0004
360	0,84859	0,1514	0,00038
432	0,82543	0,17456	0,00037
504	0,80344	0,19655	0,00037
576	0,78248	0,21751	0,00036
648	0,76242	0,23757	0,00035
720	0,74319	0,2568	0,00035
792	0,72471	0,27528	0,00034

864	0,70693	0,29306	0,00034
936	0,68979	0,3102	0,00033
1008	0,67325	0,32674	0,00033
1080	0,65727	0,34272	0,00033
1152	0,64182	0,35817	0,00032
1224	0,62687	0,37312	0,00032
1296	0,61239	0,3876	0,00032
1398	0,59263	0,40736	0,00031
1440	0,58475	0,41524	0,00031
1512	0,57154	0,42845	0,00031
1584	0,55873	0,44126	0,00031
1656	0,54628	0,45371	0,00031
1728	0,53419	0,4658	0,0003
1800	0,52243	0,47756	0,0003
1872	0,511	0,48899	0,0003
1944	0,49988	0,50011	0,0003
2016	0,48906	0,51093	0,0003
2088	0,47853	0,52146	0,0003
2160	0,46828	0,53171	0,0003

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración 4.9 y 4.10).

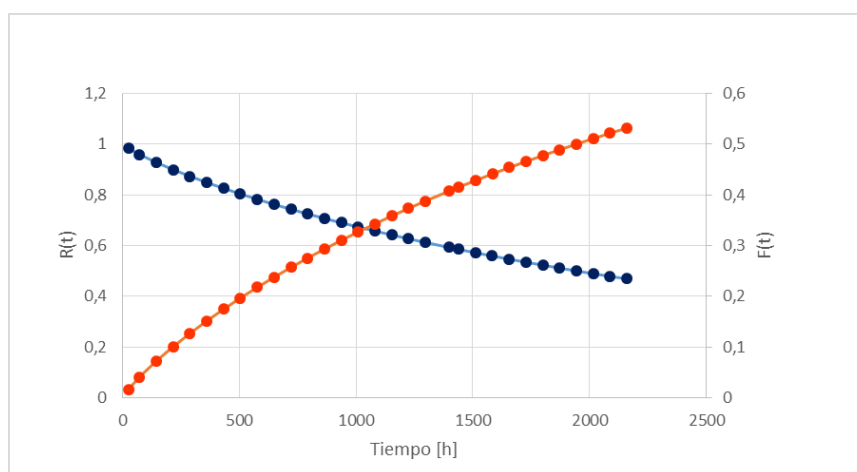


Ilustración 4.9: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.

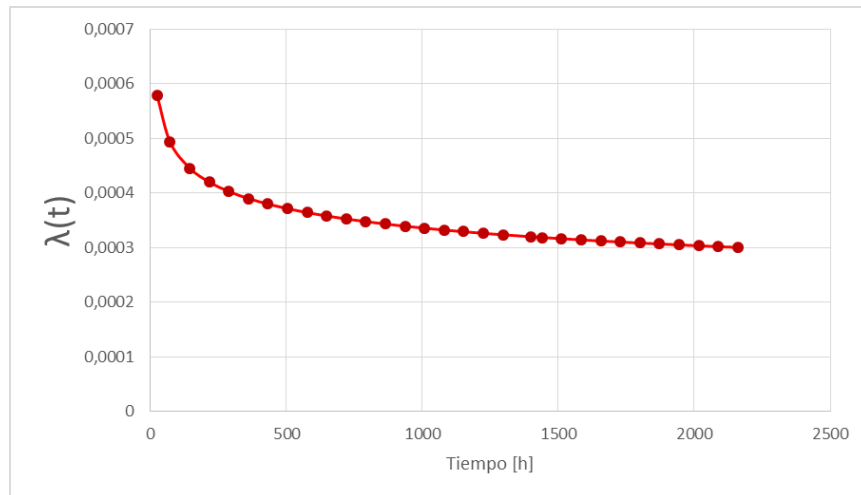


Ilustración 4.10: Tasa de falla vs tiempo de ventilador de tiro inducido en hornos de limpieza de escoria.

Como se puede observar en la Tabla 4.16, la confiabilidad del Wesp hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,74319** lo cual refleja que el equipo llega con una excelente confiabilidad. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 74,3\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.5.1. Medidas Correctivas

MPA 111 (Anual)

- Revisión del estado en la base de hormigón y base metálica.
- Revisión del estado de los absorbedores.
- Realizar lavado del rodete.

Recomendación:

- Incorporación de escalera para poder acceder de forma correcta al equipo.
- Incorporación de barandas, ya que el equipo se encuentra en elevación.
- Remover exceso de hormigón sobre los absorbedores.
- Incorporar un sistema de purga de condensación para evitar que la condensación dañe la junta de expansión.

4.3.6. Bomba flushing de hornos de refinación

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.17: Parámetros de Weibull de bomba flushing de horno de refinación.

β	0,567684296
η	2.382,846452
γ	0
MTBF	3.868,982972

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,5677$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 3868 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla 4.17, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación ver Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de bomba flushing de hornos de refinación respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,92911	0,07088	0,00173
72	0,87182	0,12817	0,00108
144	0,81603	0,18396	0,0008
216	0,7742	0,22579	0,00067
288	0,73983	0,26016	0,00059
360	0,71033	0,28966	0,00053
432	0,68433	0,31566	0,00049
504	0,66099	0,339	0,00046
576	0,63979	0,3602	0,00044
648	0,62033	0,37966	0,00041
720	0,60234	0,39765	0,00039

792	0,5856	0,41439	0,00038
864	0,56995	0,43004	0,00036
936	0,55525	0,44474	0,00035
1008	0,54139	0,4586	0,00034
1080	0,52828	0,47171	0,00033
1152	0,51585	0,48414	0,00032
1224	0,50403	0,49596	0,00031
1296	0,49277	0,50722	0,0003
1398	0,47768	0,52231	0,0003
1440	0,47174	0,52825	0,00029
1512	0,46189	0,5381	0,00029
1584	0,45244	0,54755	0,00028
1656	0,44336	0,55663	0,00027
1728	0,43463	0,56536	0,00027
1800	0,42622	0,57377	0,00026
1872	0,41811	0,58188	0,00026
1944	0,41029	0,5897	0,00026
2016	0,40274	0,59725	0,00025
2088	0,39543	0,60456	0,00025
2160	0,38837	0,61162	0,00024

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustraciones 4.11 y 4.12).

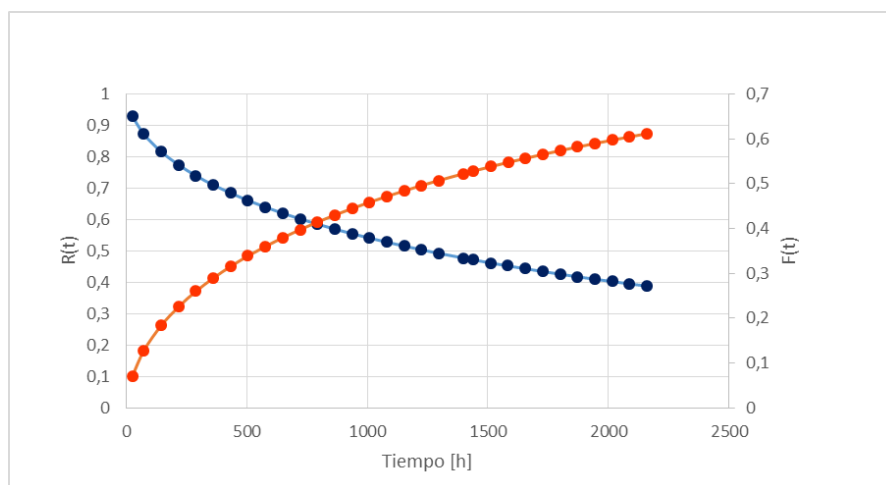


Ilustración 4.11: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de bomba flushing hornos de refinación.

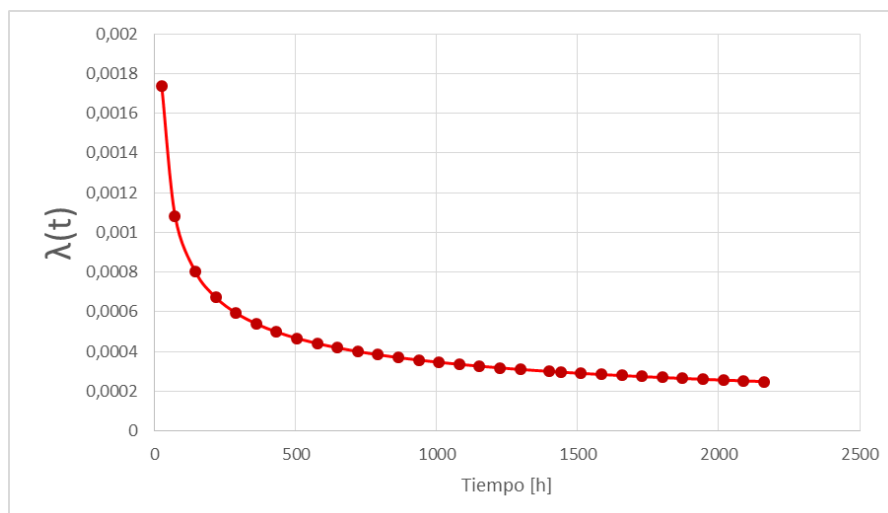


Ilustración 4.12: Tasa de falla vs tiempo de bomba flushing de hornos de refinación.

Como se puede observar en la Tabla 4.18, la confiabilidad de la bomba flushing de hornos de refinación hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,60234** lo cual refleja que el equipo llega con una condición que necesita ser mejorada. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 54,9\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.6.1. Medidas Correctivas

MPA 112 (*Mensual*)

- Revisión del estado de la junta de expansión de admisión y descarga de la bomba.
- Revisión del estado de la carcasa.

MPA 113 (*Semestral*)

- Revisión del estado de la junta de expansión de admisión y descarga de la bomba.
- Revisión del estado de la carcasa.
- Realización de prueba de válvulas de corte y válvula check en línea de lavado.

Recomendación:

- Cambio de junta de expansión por una con material resistente al fluido de trabajo.
- Cambio de válvula de corte y válvula check por una de material resistente al fluido de trabajo

4.3.7. Bomba flushing de hornos de limpieza de escoria

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla 4.19: Parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.

β	0,91016898
η	3168,745342
γ	0
MTBF	3313,952606

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,9102$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 3.313 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla 4.19, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla).

Tabla 4.20: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria respecto al tiempo.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,98832	0,01167	0,00044
72	0,96858	0,03141	0,0004
144	0,94177	0,05822	0,00037
216	0,91689	0,0831	0,00036
288	0,89338	0,10661	0,00035
360	0,87099	0,129	0,00034
432	0,84954	0,15045	0,00034
504	0,82893	0,17106	0,00033
576	0,80907	0,19092	0,00033
648	0,78991	0,21008	0,00033
720	0,77138	0,22861	0,00032
792	0,75344	0,24655	0,00032

864	0,73607	0,26392	0,00032
936	0,71922	0,28077	0,00032
1008	0,70287	0,29712	0,00031
1080	0,68699	0,313	0,00031
1152	0,67156	0,32843	0,00031
1224	0,65656	0,34343	0,00031
1296	0,64198	0,35801	0,00031
1398	0,62198	0,37801	0,0003
1440	0,61397	0,38602	0,0003
1512	0,60052	0,39947	0,0003
1584	0,58742	0,41257	0,0003
1656	0,57466	0,42533	0,0003
1728	0,56222	0,43777	0,0003
1800	0,5501	0,44989	0,0003
1872	0,53828	0,46171	0,0003
1944	0,52675	0,47324	0,0003
2016	0,51551	0,48448	0,00029
2088	0,50454	0,49545	0,00029
2160	0,49384	0,50615	0,00029

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración 4.13 y 4.14).

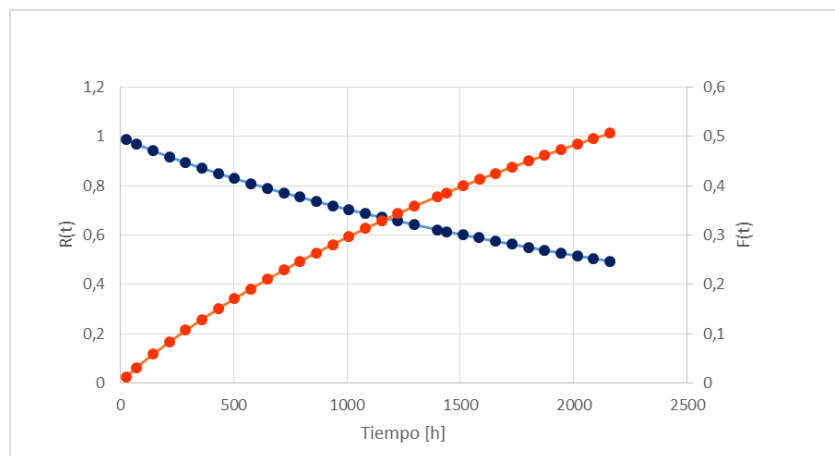


Ilustración 4.13: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de bomba flushing hornos de limpieza de escoria.

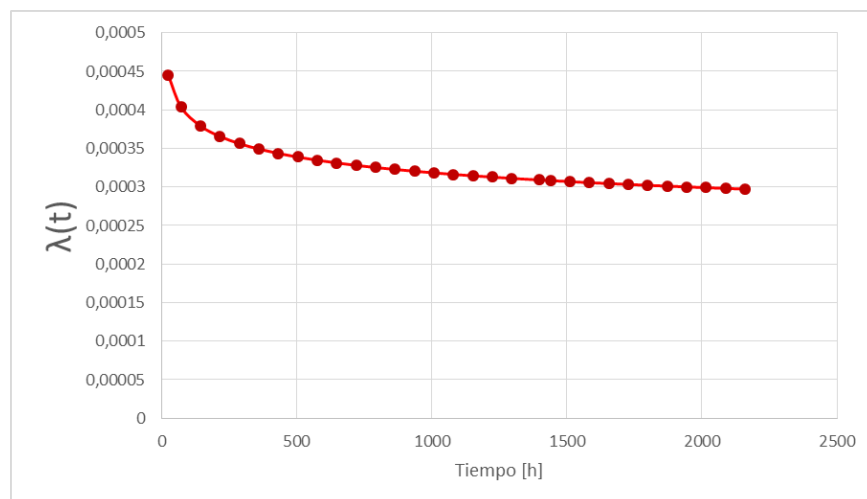


Ilustración 4.14: Tasa de falla vs tiempo de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.

Como se puede observar en la Tabla 4.20, la confiabilidad de la Bomba Flushing de hornos de limpieza de escoria hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,77138** lo cual refleja que el equipo llega con una excelente confiabilidad. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 77,1\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

4.3.7.1. Medidas Correctivas

MPA 112 (*Mensual*)

- Revisión del estado de la junta de expansión de admisión y descarga de la bomba.
- Revisión del estado de la carcasa.

MPA 113 (*Semestral*)

- Revisión del estado de la junta de expansión de admisión y descarga de la bomba.
- Revisión del estado de la carcasa.
- Realización de prueba de válvulas de corte y válvula check en línea de lavado.

Recomendación:

- Crear una pauta de mantenimiento eléctrico similar a la pauta ELC 255 de la bomba flushing HR y bomba de recirculación HR:
 - Revisión del estado, conexiones y limpieza de la estación de control.
 - Revisión del estado, conexiones y limpieza del motor eléctrico.
 - Revisión del estado, conexiones y limpieza del partidor.
- Cambio de válvula de corte y válvula check por una de material resistente al fluido de trabajo

5. Conclusiones

Se realizó un análisis de criticidad de los equipos de las plantas de tratamiento de gases de hornos de refinación y limpieza de escorias, siendo considerados los factores: daño a personas, impacto ambiental, pérdida operacional/material, legal y regulatorio, impacto en la reputación, social y/o comunidad.

De ellos, surgieron 7 equipos catalogados con criticidad B, los cuales fueron analizados en el desarrollo de este trabajo.

Mediante el análisis de modo de fallas y efectos críticos (AMFEC), se determinó una serie de características relevantes, las cuales tienen un potencial que pudiera perjudicar la continuidad de la operación de la planta, afectando a la vez al proceso de producción de la Fundición Chagres.

Se realiza un levantamiento de datos, ocupando la plataforma del sistema Ellipse, en el cual estaban registrados los fallos que tuvieron los equipos desde su puesta en marcha, hasta el día 9/10/2018, fecha límite considerada para el cálculo de confiabilidad.

Posteriormente, con el registro de los datos, se procede a realizar cálculos de confiabilidad de los equipos, para ver su comportamiento actual. Frente a esto, se evidencia que muchos de los tópicos resaltados por el AMFEC no son considerados en las pautas realizadas actualmente a los equipos.

En base a esto, se propone una estrategia de mantenimiento preventivo, para la optimización de las pautas de mantenimiento existentes de mecánica, eléctrica e instrumentación, con los datos proporcionados por el AMFEC.

Adicionalmente, se realizó el mismo procedimiento de análisis para 5 equipos existentes en la planta de separación sólido/líquido, la cual es externa a las plantas de tratamiento de gases, pero que cumple una labor que impacta a dichas plantas. Al igual que en los equipos de las plantas de tratamiento de gases, se sugieren una serie de medidas correctivas.

Cabe señalar, que durante el transcurso de esta memoria, se hicieron estudios pertinentes sobre la factibilidad de rediseñar los filtros separadores tipo lamella, cambiándolo de material

base A-36 a 316-L. A pesar de esto, se considera prudente mantener las medidas correctivas realizadas sobre el filtro separador lamella anterior.

En conjunto con los mantenedores del área, se analizan y se proponen una serie de recomendaciones, las cuales consisten en:

- Realizar rotación de las bombas de recirculación de hornos de refinación y hornos de limpieza de escoria 1 vez por semana.
- Cambio de válvulas de corte en línea de lavado y recirculación:
 - Válvula mariposa marca Ebron de 10” y 6”, asiento de Nitrilo, disco de acero inox. AISI 316 con recubrimiento de UHWM-PE.
- Creación de pauta de mantenimiento mecánico y eléctrico para damper de corte en ducto colector de gases de hornos de refinación y limpieza de escoria.
- Incorporar un sistema de purga de condensación, así se evita el daño en la junta de expansión en los ventiladores de tiro inducido tanto en hornos de refinación como hornos de limpieza de escoria.
- Incorporación de escalera y barandas para el acceso y seguridad del personal, remover exceso de hormigón sobre absorbedores en ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.
- Cambio de juntas de expansión y válvulas check por unas con material resistente al fluido del trabajo en bombas flushing de hornos de refinación y limpieza de escoria:
 - Junta de expansión marca Teguflex (misma marca que la actual) de 5” y 4” con forro interno de Hypalon y forro externo de Cloropreno.
 - Válvula check tipo wafer, marca Genebre, de doble disco de 6”, construcción de acero inox. AISI 316, disco de acero inox. AISI 316, asiento de Nitrilo.
- Creación de pauta de mantenimiento eléctrico similar a pauta ELC 255 para bombas flushing y bombas de recirculación en hornos de limpieza de escoria.
- Mandar 1 o más ejes del sistema sacudidor de tortas a analizar por falla mecánica (fatiga).

Finalmente se plantea como objetivo a futuro, poder realizar nuevamente este análisis, considerando las modificaciones sugeridas por este trabajo, verificando la variación de la confiabilidad dentro de un periodo establecido, similar al considerado en este análisis.

6. Referencias

- [1] Decreto N°28. Ministerio del Medio Ambiente. Establece Norma de Emisión Para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico. Santiago, 12 de diciembre de 2013
- [2] MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. North Carolina, Aladon Ltd, 2004. p.22-132.
- [3] DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. Calpe Institute of Technology, 2010. p.296.
- [4] GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma. 3ª ed. México, McGraw-Hill, 2013. P. 380-394.
- [5] LANGE, Kevin y LEGGETT, Steven. Análisis de Modos y Efectos de Fallas Potenciales, AMEFs. 3ª ed. USA, AIAG, 2001 p. 66
- [5] LIBRERÍA HOR DAGO. AMFE Análisis modal de Fallo y Efectos. [en línea]. <<https://es.scribd.com/doc/2935466/AMEF-Analisis-Modal-de-Fallas-yEfectos>> [24 julio 2018]
- [6] OYANEDEL GIAVERINI, Naria. Exposición laboral a arsénico. [Nota Técnica]. Santiago, Chile. Instituto de Salud Pública de Chile. Septiembre 2015
- [7] MINISTERIO DE SALUD. Vigilancia biológica de la población expuesta a cadmio. [Guía Clínica]. Santiago, Chile. MINSAL, 2014
- [8] SERVICIO AGRICOLA Y GANADERO. Metales pesados en la salud. Santiago, Chile < <http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/> > [consulta: 7 junio 2018]
- [9] CENMA. Efectos del SO₂ en la salud de las personas. [en línea]. Universidad de Chile. < planesynormas.mma.gob.cl/ > [consulta: 7 junio 2018]
- [10] FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Ventiladores [en línea] <<http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=9/>> [consulta: 20 agosto 2018]
- [11] FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Bombas Centrífugas [en línea] <<http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=8/>> [consulta: 20 agosto 2018].

[12] NEALE, Michael J. Tribology Handbook. 2nd Edition, Butterworth Heinemann, EEUU, 1995. E8.1 – E8.2.

[13] ARATA, Adolfo. Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Santiago, Chile: RIL Editores. 2009.

[14] BARRIENTOS, Gabriel. Gestión del mantenimiento.

En: Diplomado: Mantenimiento, confiabilidad y análisis de fallas en equipos mecánicos. 2014 Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Tecnológicas U. de Concepción. p.173

ANEXO A

Matriz de criticidad

Tabla A.1: Matriz de criticidad.

Matriz de Riesgos		Consecuencias (Efecto Peligroso)				
Tipos de Pérdidas		(Cuando un evento tiene más de un "tipo de pérdida", cambie la "consecuencia" por el nivel mayor)				
(Identifique y clasifique el más adecuado)		1	2	3	4	5
Insignificante		Menor	Moderado	Mayor	Catastrófico	
(S-S) Daño a personas (Seguridad Salud)	Primeros auxilios / Exposición menor a riesgos para la salud	Tratamiento Médico / Exposición mayor a riesgos para la salud	Lesión con tiempo perdido / Impacto reversible para la salud	Fatalidad Simple o Pérdida de Calidad de Vida / Irreversible para la salud	Multiple Fatalidades / Impacto para la salud con consecuencia de muerte	
	Daño mínimo al medio ambiente / Incidente Nivel 1 (Guías Anglo)	Daño medio al ambiente Incidente Nivel 2 Remediable en el corto plazo	Serio daño al medio ambiente Incidente Nivel 2 Remediable en la Vida de la operación (LOM)	Daño mayor al medio ambiente Incidente Nivel 2 Remediable posterior a la vida de la operación (Post-LOM)	Daño Extremo al Medio Ambiente Incidente Nivel 3 Irreversible	
(PO-Mat.)		Sin interrupción de la Operación	Breve interrupción de la operación	Detención Parcial	Pérdida Parcial de la Operación	Pérdida total de la Operación
Interrupción del Negocio, Daño Material o Pérdidas que compromete la División o Compañía	US\$ 20 k a US\$ 100 k	US\$ 100 k a US\$ 10 M	US\$ 10 M a US\$ 100 M	US\$ 100 M a US\$ 1 B	US\$ 1 B a US\$ 10 B	Superior US\$ 10 B
	Pérdida Operacional, Daños que comprometan un Proceso	menor a US\$ 16 k	US\$ 16 k a US\$ 160 k	US\$ 160 k a US\$ 1.6 M	US\$ 1.6 M a US\$ 16.0 M	Superior US\$ 16.0 M
(LyR) Legal y Regulatorio		Suceso de bajo Impacto Legal	Suceso Legal Menor; No conformidad e infracción a la ley	Infracción seria a la Ley; Investigación / Reporte por Autoridades; Posible acciones judiciales y/o sanción legal moderada	Infracción Mayor de la Ley; Acciones judiciales y sanciones legales considerables	Acciones judiciales y sanciones legales muy considerables. Múltiples juicios legales y prestidio
(R-S-C) Impacto en la Reputación, Social y/o Comunidad		Impacto Leve - Puede ser de conocimiento público pero sin preocupación pública	Impacto Limitado - Preocupación pública local	Impacto Considerable - Preocupación pública regional	Impacto Nacional - Preocupación pública nacional	Impacto Internacional - Atención pública internacional
Probabilidad		Nivel de Riesgo				
5	(Casi Seguro Ocurrir)	11 (B)	16 (B)	20 (B)	23 (A)	25 (A)
4	(Probable)	7 (B)	12 (B)	17 (B)	21 (A)	24 (A)
3	(Posible)	4 (B)	8 (B)	13 (B)	18 (B)	22 (A)
2	(Improbable)	2 (C)	5 (C)	9 (B)	14 (B)	19 (B)
1	(Raro)	1 (C)	3 (C)	6 (B)	10 (B)	15 (B)

Tabla A.2: Tabla de probabilidad aplicada en matriz de criticidad.

Probabilidad		Ejemplo de evento
5	(Casi seguro Ocorre)	El incidente ocurre con frecuencia; del orden de uno o más por año o es probable que ocurra dentro del año
4	(Probable)	El incidente ocurrió pocas veces; menos de uno por año o es probable que ocurra dentro de los 5 años
3	(Posible)	El incidente ocurrió pocas veces; menos de un por año o es probable que ocurra dentro de los 5 años
2	(Improbable)	El incidente ocurrió alguna vez en el pasado; o puede ocurrir en los próximos 20 años
1	(Raro)	El incidente nunca ha ocurrido y es muy poco probable que ocurra en los próximos 20 años

Tabla A.3: Tabla de categoría y riesgo aplicada en matriz de criticidad.

Categoría de Riesgo	Nivel de Riesgo	Guías para la Matriz de Riesgos
21 a 25	(A)	Eliminar, evitar, implementar un plan de acción específico / procedimiento para administrar y monitorear
13 a 20	(B)	Administrar preventivamente
6 a 12	(B)	Administrar permanentemente (mantener siempre bajo control)
1 a 5	(C)	Monitorear y administrar apropiadamente

ANEXO B

Análisis de Modos de Fallas y Efectos Críticos de los equipos evaluados (AMFEC)

Tabla B.1: AMFEC de precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)													
Equipo:		Precipitador Electrostático Húmedo HR (Wesp)				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:		Mantenición		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad	
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección				
Subsistema de Transporte de gases	Transporte de gases desde ducto colector hasta ducto de descarga de gases y entre los mismos precipitadores	Pérdida parcial o total del caudal de gases transportados desde ducto colector de gases hasta ducto de desgarga de gases	Rotura/deterioro de ducto colector	Fuga de gases y líquidos condensados	10	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de ducto descarga de gases		4	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de ducto de expansión de ducto colector de gases		10	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	2	Inspección visual en terreno	8	160	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de ducto descarga de gases		5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto colector de gases	Pérdida de eficiencia en el transporte de gases	5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto descarga de gases		4	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	2	Inspección visual en terreno	8	64	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Falla del sensor de temperatura de gases	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del ducto colector de gases	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Falla sensor de temperatura de gases tratados	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del ducto de descarga de gases	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Falla del opacimetro de gases de entrada	Indica una incorrecta lectura de la opacidad de los gases de entrada a la torre quench	3	mala manipulación, suciedad del lente óptico, conexiones defectuosas	2	Inspección en estación de trabajo	5	30	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo del sensor de presión de los gases de entrada a la torre	Indica una incorrecta lectura de la presión de gases a la entrada de gases	3	Falla del transmisor, mala manipulación, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo del sensor de presión de los gases tratados	Indica una incorrecta lectura de la presión de gases a la salida del precipitador	3	Falla del transmisor, mala manipulación, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo en el Damper	incapacidad de regular el flujo en el tren de gases	7	Falla en el motor electrico, falla del reductor de velocidad, falla del eje, fallo de los pernos de paleta, falla de la paleta	1	Inspección en consola de control	3	21	Inspeccionar estado del damper, reparar sección dañada si es necesario	Mecánico	
		Incapacidad de guiar los gases de PTG-HR a PTG-HLE	Deterioro del flange ciego	Incumplimiento de Operación de Emergencia (Traspaso de gases de PTG-HR a PTG-HLE	7	Desgaste corrosivo o deformación de los flanges	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspeccionar estado del flange	Mecánico	

Subsistema de Lavado de Gases y Recirculación	Lavado gases, Precipitación preliminar de partículas de gases y recirculación del agua de procesos y agua de emergencia	Falla del sistema de agua recirculación	Obstrucción del ducto de rebalse	Rebalse de Torre Quench	5	Presencia y exceso de lodo en el fondo de la torre	1	Inspección en estación de trabajo	7	35	Inspeccionar estado del ducto, hacer lavado de ducto de ser necesario	Mecánico
			Falla del sensor de nivel	Indica una lectura incorrecta	3	Sensor obstruido con lodo, diafragma trabado, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	7	21	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Deterioro/rotura/obstrucción de ductos de recirculación	Fuga de agua de procesos	5	Desgaste erosivo y acumulación de lodo al interior de los ductos	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del ducto, enviar a reparación	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de recirculación	Pérdida de presión de agua en línea recirculación	6	Exceso de lodo	1	Inspección visual cuando el precipitador es abierto	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador es abierto	Mecánico
		Falla del sistema de agua emergencia	Deterioro de la línea de agua de emergencia	Pérdida de presión de agua en línea de emergencia	8	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	64	Inspeccionar estado de la línea, cambiar sección dañada de ser necesario	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de agua emergencia	Filtración de agua de emergencia	8	Exceso de suciedad	1	Inspección visual cuando el precipitador es abierto	8	64	Inspeccionar cuando el precipitador es abierto	Mecánico
		Falla del sistema de agua flushing	Deterioro/rotura/obstrucción de la línea de flushing	Filtración de agua de procesos y pérdida de presión de agua en línea flushing	6	Desgaste erosivo y acumulación de lodo al interior de los ductos	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado del ducto, enviar a reparación	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de flushing	Acumulación de MP en electrodos de recolección	6	Exceso de lodo	1	Inspección visual en terreno cuando el precipitador esté detenido	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador esté detenido	Mecánico
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Daño/deterioro de electrodo(s)	Deficiencia del abatimiento de partículas	7	Corte por arco eléctrico, electrocorrosión en el electrodo	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	28	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / cambiar electrodo	Electricista
			Electrodo(s) descentrado(s)		5	Intensidad excesiva del flujo de los gases, acumulación de material particulado (lodo)	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	5	25	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / centrar electrodo	Electricista
			Daño en electrodos de recolección		6	Corte por arco eléctrico	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	24	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / tapar sección	Electricista
			Obstrucción de electrodos de recolección		7	Acumulación de material particulado (lodo), deficiencia en proceso flushing	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	2	14	Revisión en el panel de control / consola por cambios en la eficiencia	Electricista

Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Falla por sobrecalentamiento del T-R	Aumento de temperatura	8	Mala conexión interna, pérdida o bloqueo en el sistema de aceite refrigerante	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla por sobrecorriente del T-R		8	Corto circuito en el devanado secundario o rotura del devanado	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobreflujo magnetico en T-R	Resonancia	8	Tensión excesiva	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrepresión en el T-R	Aumento de temperatura	8	Emisión de gases generados por calentamiento local	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla a tierra del T-R		9	Fase con contacto a tierra (cortocircuito) debido a pérdida de aislación	1	Inspección en subestación / en terreno	4	36	Revisión del sistema puesta a tierra	Electricista
			Falla en el puente rectificador	Falla conversión C.A a C.C	6	Corto circuito	1	Inspección en subestación / en terreno	4	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla del sensor de temperatura	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del precipitador	3	Mala instalación, falla del transmisor, conexiones defectuosas	2	Inspección en estación de trabajo	3	18	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla por comunicación	el equipo no responde a requerimientos de operación	6	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	2	Inspección en subestación	6	72	Revisar las conexiones	Electricista
			Daño en Aisladores	Deficiencia del abatimiento de partículas	9	Fractura de los aisladores, presencia de humedad	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	36	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
			Obstrucción de los aisladores		5	Suciedad excesiva en el compartimento de los aisladores	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	20	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema aire purga	Obstrucción de filtro compresores	Permite de forma parcial el ingreso de vapor o neblina al compartimento de aisladores	5	Suciedad excesiva del filtro	1	Inspección en estación de trabajo	8	40	Cambiar periodicamente	Mecánico
			Falla motor electrico solpladores aire purga		6	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en consola de control	3	18	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla mecánica solpladores aire purga		6	Falla carcasa, deterioro del rodete , rodamientos dañados	2	Inspección en consola de control	3	36	Inspeccionar condición de los sopladores, ver si es posible reparar, de lo contrario cambiar	Mecánico

Subsistema Estructural	Brinda soporte para desplazamiento y seguridad del personal	Falta de seguridad hacia el personal e imposibilidad de tránsito libre	Desprendimiento o rotura del grating	Caída de personal o atrapamiento de extremidades	5	Corrosión de la estructura	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del grating, cambiar sección del grating	Mecánico
			Deterioro o rotura de barandillas de seguridad		5	Corrosión de la estructura	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de las barandillas, soldar o cambiar barandilla	Mecánico
	Brinda la capacidad de contener derrame de fluido de trabajo en la planta	Incapacidad de contener los fluidos filtrados	deterioro del piso de la planta	Filtración de agua de procesos	5	trizadura del piso, rotura del piso, material inadecuado	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del piso, cambiar sección de piso y colocar recubrimiento compatible con el fluido de trabajo	Mecánico

Tabla B.2: AMFEC de precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)													
Equipo:		Precipitador Electrostático Húmedo HLE (Wesp1)				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:		Mantenición		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad	
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección				
Subsistema de Transporte de gases	Transporte de gases desde ducto colector hasta ducto de descarga de gases y entre los mismos precipitadores (Wesp1 y Wesp2)	Pérdida parcial o total del caudal de gases transportados desde ducto colector de gases hasta ducto de descarga de gases hacia el Wesp2	Rotura/deterioro de ducto colector	Fuga de gases y líquidos condensados	10	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de ducto descarga de gases hacia Wesp2		4	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de ducto colector de gases		10	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	2	Inspección visual en terreno	8	160	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de ducto descarga de gases hacia Wesp2	Pérdida de eficiencia en el transporte de gases	6	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	2	Inspección visual en terreno	8	96	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto colector		5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto descarga de gases hacia Wesp2		5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Falla del sensor de temperatura de gases	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del ducto colector de gases	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Falla sensor de temperatura de gases tratados	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del ducto de descarga de gases	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Falla del opacimetro de gases de entrada	Indica una correcta lectura de la opacidad de los gases de entrada a la torre quench	3	mala manipulación, suciedad del lente óptico, conexiones defectuosas	2	Inspección en estación de trabajo	5	30	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo del sensor de presión de los gases de entrada a la torre	Indica una incorrecta lectura de la presión de gases a la entrada de gases	3	Falla del transmisor, mala manipulación, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo del sensor de presión de los gases tratados	Indica una incorrecta lectura de la presión de gases a la salida del precipitador	3	Falla del transmisor, mala manipulación, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	
			Fallo del Damper	incapacidad de regular el flujo en el tren de gases	7	Falla en el motor electrico, falla del reductor de velocidad, falla del eje, fallo de los pernos de paleta, falla de la paleta	1	Inspección en consola de control	3	21	Inspeccionar estado del damper, reparar sección dañada si es necesario	Mecánico	
		Incapacidad de guiar los gases de PTG-HR a PTG-HLE	Deterioro del flange ciego	Incumplimiento de Operación de Emergencia (Traspaso de gases de HR a PTG-HLE	7	Desgaste corrosivo o deformación de los flanges	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspeccionar estado de flange	Mecánico	

Subsistema de Lavado de Gases y Recirculación	Lavado gases, Precipitación preliminar de partículas de gases y recirculación del agua de procesos y agua de emergencia	Falla del sistema de agua recirculación	Obstrucción del ducto de rebalse	Rebalse de Torre Quench	5	Presencia y exceso de lodo en el fondo de la torre	2	Inspección en estación de trabajo	7	70	Inspeccionar estado del ducto, hacer lavado de ducto de ser necesario	Mecánico
			Falla del sensor de nivel	Indica una lectura incorrecta	3	Sensor obstruido con lodo, diafragma trabado	2	Inspección en estación de trabajo	7	42	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Deterioro/rotura/obstrucción de ductos de recirculación	Fuga de agua de procesos	5	Desgaste erosivo y acumulación de suciedad al interior de los ductos	2	Inspección visual en terreno	7	70	Inspeccionar estado del ducto, enviar a reparación	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de recirculación	Pérdida de presión de agua en línea de recirculación	6	Exceso de lodo	1	Inspección visual cuando el precipitador es abierto	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador es abierto	Mecánico
		Falla del sistema de agua emergencia	Deterioro de la línea de agua de emergencia	Pérdida de presión de agua en línea de emergencia	8	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	64	Inspeccionar estado de la línea, cambiar sección dañada de ser necesario	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de agua emergencia	Filtración de agua de emergencia	8	Exceso de suciedad	1	Inspección visual cuando el precipitador es abierto	8	64	Inspeccionar cuando el precipitador es abierto	Mecánico
		Falla del sistema de agua flushing	Deterioro/rotura/obstrucción de la línea de flushing	Filtración de agua de procesos y pérdida de presión de agua en línea de flushing	6	Desgaste erosivo y acumulación de lodo al interior de los ductos	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado del ducto, enviar a reparación	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de flushing	Acumulación de MP en electrodos de recolección	6	Exceso de lodo	1	Inspección visual en terreno cuando el precipitador esté detenido	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador esté detenido	Mecánico
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Daño/deterioro de electrodo(s)	Deficiencia del abatimiento de partículas	7	Corte por arco eléctrico, electrocorrosión en el electrodo	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	28	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / cambiar electrodo	Electricista
			Electrodo(s) descentrado(s)		7	Intensidad excesiva del flujo de los gases, acumulación de material particulado (lodo)	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	6	42	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / centrar electrodo	Electricista
			Daño en electrodos de recolección		7	Corte por arco eléctrico	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	2	14	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / tapar sección	Electricista
			Obstrucción de electrodos de recolección		7	Acumulación de material particulado (lodo), deficiencia en proceso flushing	2	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	2	28	Revisión en el panel de control / consola por cambios en la eficiencia	Electricista

Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Falla por sobrecalentamiento del T-R	Aumento de temperatura	8	Mala conexión interna, pérdida o bloqueo en el sistema de aceite refrigerante	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla por sobrecorriente del T-R		8	Corto circuito en el devanado secundario o rotura del devanado	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobreflujo magnetico en T-R	Resonancia	8	Tensión excesiva	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrepresión en el T-R	Aumento de temperatura	8	Emisión de gases generados por calentamiento local	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla a tierra del T-R	Explosión del Transformador	9	Fase con contacto a tierra (cortocircuito) debido a pérdida de aislación	1	Inspección en subestación / en terreno	4	36	Revisión del sistema puesta a tierra	Electricista
			Falla en el puente rectificador	Falla conversión C.A a C.C	6	Corto circuito	1	Inspección en subestación / en terreno	4	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla del sensor de temperatura	Indica una lectura incorrecta de la temperatura al interior del precipitador	3	Mala instalación, falla del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	3	9	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla por comunicación	el equipo no responde a requerimientos de operación	6	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	2	Inspección en subestación	6	72	Revisar las conexiones	Electricista
			Daño en Aisladores	Deficiencia del abatimiento de partículas	9	Fractura de los aisladores, presencia de humedad	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	36	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
			Obstrucción de los aisladores		5	Suciedad excesiva en el compartimento de los aisladores	2	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	40	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema aire purga	Obstrucción de filtro compresores	Permite de forma parcial el ingreso de vapor o neblina al compartimento de aisladores	5	Suciedad excesiva del filtro	1	Inspección en estación de trabajo	8	40	Cambiar periodicamente	Mecánico
			Falla motor electrico solpladores aire purga		6	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas	1	Inspección en consola de control	3	18	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla mecánica solpladores aire purga		6	Falla carcasa, deterioro del rodete, rodamientos dañados	2	Inspección en consola de control	3	36	Inspeccionar condición de los sopladores, ver si es posible reparar, de lo contrario cambiar	Mecánico

Subsistema Estructural	Brinda soporte para desplazamiento y seguridad del personal	Falta de seguridad hacia el personal e imposibilidad de tránsito libre	Desprendimiento o rotura del grating	Caída de personal o atrapamiento de extremidades	5	Corrosión de la estructura	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del grating, cambiar sección del grating	Mecánico
			Deterioro o rotura de barandillas de seguridad		5	Corrosión de la estructura	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de las barandillas, soldar o cambiar barandilla	Mecánico
	Brinda la capacidad de contener derrame de fluido de trabajo en la planta	Incapacidad de contener los fluidos filtrados	deterioro del piso de la planta	Filtración de agua de procesos	5	trizadura del piso, rotura del piso, material inadecuado	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del piso, cambiar sección de piso y colocar recubrimiento compatible con el fluido de trabajo	Mecánico

Tabla B.3: AMFEC de precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)													
Equipo:		Precipitador Electrostático Húmedo HLE (Wesp2)				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:		Mantenimiento		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad	
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección				
Subsistema de Transporte de gases	Transporte de gases desde ducto colector hasta ducto de descarga de gases y entre los mismos precipitadores	Pérdida parcial o total del caudal de gases transportados desde ducto colector de gases hasta ducto de descarga de gases	Rotura/deterioro de ducto descarga de gases de Wesp1	Fuga de gases y líquidos condensados	4	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de ducto descarga de gases		4	Desgaste corrosivo / erosivo, Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspeccionar condición del ducto, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de ducto descarga de gases de Wesp1		6	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	2	Inspección visual en terreno	8	96	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de ducto descarga de gases	Pérdida de eficiencia en el transporte de gases	5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material, daño de los fuelles	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto descarga de gases desde Wesp1		5	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de ducto descarga de gases		4	Desgaste corrosivo / erosivo, fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Falla sensor de temperatura de gases tratados	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista		
			Fallo del sensor de presión de los gases tratados	3	Falla del transmisor, mala manipulación, conexiones defectuosas	1	Inspección en estación de trabajo	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista		

Subsistema de Lavado de Gases y Humidificación	Lavado y humidificación de los gases	Falla del sistema de agua flushing	Deterioro/rotura/obstrucción de la línea de flushing	Filtración de agua de procesos y pérdida de presión de agua en línea flushing	6	Desgaste erosivo y acumulación de lodo al interior de los ductos	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado del ducto, enviar a reparación	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de flushing	Acumulación de MP en electrodos de recolección	6	Exceso de lodo	1	Inspección visual en terreno cuando el precipitador esté detenido	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador esté detenido	Mecánico
		Falla del sistema de agua fogging	Deterioro de la línea de fogging	Pérdida de presión de agua en línea fogging	6	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la línea, cambiar sección dañada de ser necesario	Mecánico
			Obstrucción de boquilla de fogging	Filtración de agua make up	6	Exceso de suciedad	1	Inspección visual en terreno cuando el precipitador esté detenido	8	48	Inspeccionar cuando el precipitador esté detenido	Mecánico
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Daño/deterioro de electrodo(s)	Deficiencia del abatimiento de partículas	7	Corte por arco eléctrico, electro-corrosión en el electrodo	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	28	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / cambiar electrodo	Electricista
			Electrodo(s) descentrado(s)		7	Intensidad excesiva del flujo de los gases, acumulación de material particulado (lodo)	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	6	42	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / centrar electrodo	Electricista
			Daño en electrodos de recolección		7	Corte por arco eléctrico	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	2	14	Revisión en panel eléctrico en busca de peaks de los indicadores / tapar sección	Electricista
			Obstrucción de electrodos de recolección		7	Acumulación de material particulado (lodo), deficiencia en proceso flushing	2	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	2	28	Revisión en el panel de control / consola por cambios en la eficiencia	Electricista
			Falla por sobrecalentamiento del T-R	Aumento de temperatura	8	Mala conexión interna, pérdida o bloqueo en el sistema de aceite refrigerante	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla por sobrecorriente del T-R		8	Corto circuito en el devanado secundario o rotura del devanado	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobreflujo magnetico en T-R	Resonancia	8	Tensión excesiva	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrepresión en el T-R	Aumento de temperatura	8	Emisión de gases generados por calentamiento local	1	Inspección en subestación / en terreno	4	32	Revisión de las conexiones eléctricas, revisión del nivel de aceite	Electricista
			Falla a tierra del T-R	Explosión del Transformador	9	Fase con contacto a tierra (cortocircuito) debido a pérdida de aislación	1	Inspección en subestación / en terreno	4	36	Revisión del sistema puesta a tierra	Electricista
			Falla en el puente rectificador	Falla conversión C.A a C.C	6	Corto circuito	1	Inspección en subestación / en terreno	4	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista

Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema de precipitación del particulado	Falla del sensor de temperatura	Indica una lectura incorrecta	3	Mala instalación, falla del transmisor	1	Inspección en estación de trabajo	3	9	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla por comunicación	el equipo no responde a requerimientos de operación	6	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	2	Inspección en subestación	6	72	Revisión de las conexiones	Electricista
			Daño en Aisladores	Deficiencia del abatimiento de partículas	9	Fractura de los aisladores, presencia de humedad	1	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	36	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
			Obstrucción de los aisladores		5	Suciedad excesiva en el compartimento de los aisladores	2	Inspección en subestación / cuando el precipitador es abierto	4	40	Inspección del estado de los aisladores cuando el precipitador esté abierto	Electricista
Subsistema de Precipitación de Particulado	Eliminación del material particulado a través carga eléctrica	Falla del sistema aire purga	Obstrucción de filtro compresores	Permite de forma parcial el ingreso de vapor o neblina al compartimento de aisladores	5	Suciedad excesiva del filtro	1	Inspección en estación de trabajo	8	40	Cambiar periódicamente	Mecánico
			Falla motor eléctrico solpladores aire purga		6	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en consola de control	3	18	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla mecánica solpladores aire purga		6	Falla carcasa, deterioro del rodete, rodamientos dañados	1	Inspección en consola de control	3	18	Inspeccionar condición de los solpladores, ver si es posible reparar, de lo contrario cambiar	Mecánico
Subsistema Estructural	Brinda soporte para desplazamiento y seguridad del personal	Falta de seguridad hacia el personal e imposibilidad de tránsito libre	Desprendimiento o rotura del grating	Caída de personal o atrapamiento de extremidades	5	Corrosión de la estructura	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del grating, cambiar sección del grating	Mecánico
			Deterioro o rotura de barandillas de seguridad		5	Corrosión de la estructura	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de las barandillas, soldar o cambiar barandilla	Mecánico
	Brinda la capacidad de contener derrame de fluido de trabajo en la planta	Incapacidad de contener los fluidos filtrados	deterioro del piso de la planta	Filtración de agua de procesos	5	trizadura del piso, rotura del piso, material inadecuado	2	Inspección visual en terreno	8	80	Inspeccionar estado del piso, cambiar sección de piso y colocar recubrimiento compatible con el fluido de trabajo	Mecánico

Tabla B.4: AMFEC de ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Ventilador de Tiro Inducido (VTI -HR)				Gerencia:	Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:	Mantenimiento		Fecha:		xx-xx-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema de Transporte de Gases	Transportar los gases desde la boca de los Hornos de Refinación y los Hornos de Limpieza de Escoria hacia la PTG correspondiente	Incapacidad de transportar los gases desde la boca de los hornos hacia la PTG correspondiente, para luego llevarlos hacia la chimenea	Rotura o desprendimiento de partes del rodete	Disminución o ausencia de caudal de gas	8	Formación de costras, desgaste erosivo / desgaste corrosivo del impulsor	1	Inspección visual en terreno	5	40	Inspeccionar condición del rodete cada ciertas horas de funcionamiento / Lavar con agua a alta presión, cambiar alabes en caso de estar dañados o cambio completo de rodete	Mecánico
			Daño o deterioro sello del eje	Fuga de gases	5	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo del material del eje	1	Inspección visual en terreno	8	40	Cambio del sello en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño acople	Pérdida de transmisión	7	Desalineamiento, Instalación incorrecta, falla de material, soldadura	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspección del estado del acoplamiento, reapretar o cambiar en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño de los absorbedores	Vibración del equipo	3	Rotura, corrosión, desgaste o soldadura de los absorbedores	1	Inspección visual en terreno / Control de vibraciones y temperatura en consola de control	6	18	Inspeccionar estado de los absorbedores, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Daño de carcasa	Fuga de gases	5	Corrosión de la estructura	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de la carcasa, soldar de ser necesario	Mecánico
			Daño junta de expansión admisión	Fuga de gases	3	Rotura/desgaste de la junta de expansión	2	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Daño junta de expansión de descarga	Fuga de gases	3	Rotura/desgaste de la junta de expansión	2	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Fallo de rodamientos	Alza de temperatura o fundición del rodamiento, Aumento de vibraciones	8	Falta de lubricación, lubricación inadecuada, desbalanceo, desalineamiento, montaje inadecuado	1	Inspección en estación de trabajo, control de vibraciones y temperatura por consola	5	40	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Falla del sensor de temperatura	Indica una lectura incorrecta de temperatura	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor	1	Inspección en estación de control	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla del sensor de vibraciones	Indica una lectura incorrecta de vibraciones	3	Desplazamiento físicamente del sensor, fractura del bobinado interno	1	Inspección en estación de control	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista

Subsistema eléctrico	Encargado de convertir la energía eléctrica en mecánica para transmitirla a la bomba	Motor es incapaz de transmitir el movimiento	Motor eléctrico no gira	Ventilador no gira (no hay transmisión mecánica)	8	Fuente alimentación defectuosa, bobinado roto o quemado, terminales mal conectados, eje agripado por rodamiento dañado.	1	Inspección en consola de control	3	24	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Motor no alcanza la velocidad requerida	Caudal de gases insuficiente	7	Tensión baja, conexiones incorrectas, sobrecarga mecánica.	1	Inspección en consola de control	3	21	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrecorriente	El equipo no parte	8	Bobinado roto o quemado, terminal defectuoso, sobrecarga mecánica	1	Inspección en consola de control	3	24	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla del estator	El equipo no parte	8	Agotamiento del bobinado del estator	1	Inspección en subestación	1	8	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla de rodamientos internos	Vibraciones, nivel de ruido y temperatura elevada	7	Desalineamiento, Desbalanceo, Lubricación (exceso o escases), horas de funcionamiento excedidas.	1	Inspección en subestación	7	49	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Electricista
			Control eléctrico (panel)	El equipo no responde a requerimientos en terreno	5	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el panel de control primario	1	Inspección en estación de trabajo	7	35	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
		VDF no controla las rpm del motor	Falla por comunicación	VDF no responde a requerimientos de operación	8	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	2	Inspección en subestación	6	96	Revisar las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla a tierra	Variador de frecuencia se detiene	8	Fase con contacto a tierra (cortocircuito) debido a pérdida de aislación	1	Inspección en subestación	6	48	Revisar las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de soporte	Brindar soporte para posicionar el equipo	Inestabilidad o nulo soporte para posicionar el equipo	Rotura en la base metálica	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base metálica	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección del estado de la estructura metálica, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura en la base de hormigón	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base de hormigón	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección de la estructura de hormigón, adicionar material de ser necesario	Mecánico

Tabla B.5: AMFEC de ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Ventilador de Tiro Inducido (VTI -HLE)				Gerencia:		Operaciones	Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundación Chagres				Departamento:		Mantenición	Fecha:		xx-xx-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema de Transporte de Gases	Transportar los gases desde la boca de los Hornos de Refinación y los Hornos de Limpieza de Escoria hacia la PTG correspondiente	Incapacidad de transportar los gases desde la boca de los hornos hacia la PTG correspondiente, para luego llevarlos hacia la chimenea	Rotura o desprendimiento de partes del rodete	Disminución o ausencia de caudal de gas	8	Formación de costras, desgaste erosivo / desgaste corrosivo del impulsor	1	Inspección visual en terreno	5	40	Inspeccionar condicon del rodete cada ciertas horas de funcionamiento / Lavar con agua a alta presión, cambiar alabes en caso de estar dañados o cambio completo de rodete	Mecánico
			Daño o deterioro sello del eje	Fuga de gases	5	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo del material del eje	1	Inspección visual en terreno	8	40	Cambio del sello en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño acople	Pérdida de transmisión	7	Desalineamiento, Instalación incorrecta, falla de material, soldadura	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspección del estado del acoplamiento, reapretar o cambiar en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño de los absorbedores	Vibración del equipo	3	Rotura, corrosión, desgaste o soldadura de los absorbedores	2	Inspección visual en terreno / Control de vibraciones y temperatura en consola de control	6	36	Inspeccionar estado de los absorbedores, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Daño de carcasa	Fuga de gases	5	Corrosión de la estructura	1	Inspección visual en terreno	8	40	Inspeccionar estado de la carcasa, soldar de ser necesario	Mecánico
			Daño junta de expansión admisión	Fuga de gases	3	Rotura/desgaste de la junta de expansión	2	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Daño junta de expansión de descarga	Fuga de gases	3	Rotura/desgaste de la junta de expansión	1	Inspección visual en terreno	8	24	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Fallo de rodamientos	Alza de temperatura o fundición del rodamiento, Aumento de vibraciones	8	Falta de lubricación, lubricación inadecuada, desbalanceo, montaje inadecuado	1	Inspección en estación de trabajo, control de vibraciones y temperatura por consola	5	40	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Falla del sensor de temperatura	Indica una lectura incorrecta de temperatura	3	Corte interno de la resistencia, fallo del transmisor	1	Inspección en estación de control	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla sensor de vibraciones	Indica una lectura incorrecta de vibraciones	3	Desplazamiento físicamente del sensor, fractura del bobinado interno	1	Inspección en estación de control	5	15	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista

Subsistema eléctrico	Encargado de convertir la energía eléctrica en mecánica para transmitirla a la bomba	Motor es incapaz de transmitir el movimiento	Motor eléctrico no gira	Ventilador no gira (no hay transmisión mecánica)	8	Fuente alimentación defectuosa, bobinado roto o quemado, terminales mal conectados, eje agrietado por rodamiento dañado.	1	Inspección en consola de control	3	24	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Motor no alcanza la velocidad requerida	Caudal de gases insuficiente	7	Tensión baja, conexiones incorrectas, sobrecarga mecánica.	1	Inspección en consola de control	3	21	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrecorriente	El equipo no parte	8	Bobinado roto o quemado, terminal defectuoso, sobrecarga mecánica	1	Inspección en consola de control	2	16	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla del estator	El equipo no parte	8	Agotamiento del bobinado del estator	1	Inspección en subestación	1	8	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla de rodamientos internos	Vibraciones, nivel de ruido y temperatura elevada	7	Desalineamiento, Desbalanceo, Lubricación (exceso o escases), horas de funcionamiento excedidas.	1	Inspección en subestación	8	56	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Electricista
			Control eléctrico (panel)	El equipo no responde a requerimientos en terreno	5	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el panel de control primario	1	Inspección en estación de trabajo	5	25	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
		VDF no controla las rpm del motor	Falla por comunicación	VDF no responde a requerimientos de operación	8	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	2	Inspección en subestación	7	112	Revisar las conexiones eléctricas	Electricista
			Falla a tierra	Variador de frecuencia se detiene	8	Fase con contacto a tierra (cortocircuito) debido a pérdida de aislación	1	Inspección en subestación	7	56	Revisar las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de soporte	Brindar soporte para posicionar el equipo	Inestabilidad o nulo soporte para posicionar el equipo	Rotura en la base metálica	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base metálica	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección del estado de la estructura metálica, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura en la base de hormigón	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base de hormigón	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección de la estructura de hormigón, adicionar material de ser necesario	Mecánico

Tabla B.6: AMFEC de bomba flushing de hornos de refinación.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)													
Equipo:		Bomba Flushing HR				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:		Mantenimiento		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso o actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidades	
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección				
Subsistema de transporte agua de procesos	Transportar el agua de procesos desde la torre quench hasta los aspersores ubicados en la parte superior del precipitador con el fin de remover las partículas que estén adheridas a los electrodos de recolección	Cese del transporte de agua de procesos desde la torre quench hacia los aspersores del precipitador para realizar lavado de los electrodos de recolección	Rotura/deterioro de junta de expansión de admisión bomba flushing	Pérdida de presión de agua en línea flushing	6	Desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de junta de expansión de descarga bomba flushing		6	Desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de admisión línea de agua flushing		6	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de descarga línea de agua flushing	Filtración de agua de procesos	6	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico	
			Daño en válvula check línea agua flusing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	2	Inspección en estación de trabajo	8	112	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico	
			Daño en válvulas de admisión línea de agua flushing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico	
			Daño en válvulas de descarga línea de agua flushing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico	
			Rotura o desprendimiento de partes del impulsor	Disminución o pérdida del caudal y presión en el proceso	8	Desgaste erosivo en el impulsor	1	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	48	Inspeccionar condición del impulsor mediante análisis de vibraciones, cambiar impulsor en caso de ser necesario	Mecánico	
			Daño deterioro sello mecánico	Filtración de fluido	8	Desgaste erosivo de material en el sello	2	Inspección visual en terreno	8	128	Inspeccionar condición del sello mecánico en caso de posible fuga	Mecánico	
			Daño acople	Pérdida de transmisión entre motor y bomba, vibración del equipo	7	Desalineamiento excesivo, instalación incorrecta, falla de material, soltura	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspección del estado del acoplamiento, reapretar o cambiar en caso de ser necesario	Mecánico	
			Daño de la carcaza	Detención del equipo o disminución del caudal en el proceso	6	Desgaste erosivo en las paredes de la carcasa	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la carcasa en caso de una posible fuga	Mecánico	
			Desgaste de rodamientos	Alza de temperatura o fundición del rodamiento, Aumento de vibraciones	8	Falta de lubricación, lubricación inadecuada, desbalanceo, desalineamiento	1	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	48	Inspeccionar estado de los rodamientos mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Mecánico	
			Falla del sensor de presión	Indica una lectura incorrecta de presión	3	Fallo en el diafragma, mala instalación	1	Inspección en consola de control	3	9	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista	

Subsistema eléctrico	Encargado de convertir la energía eléctrica en mecánica para transmitirla a la bomba	Motor es incapaz de transmitir el movimiento requerido	Motor eléctrico no gira	Bomba no gira (no hay transmisión mecánica)	8	Fuente alimentación defectuosa, bobinado roto o quemado, terminales mal conectados, eje bloqueado por rodamiento dañado.	1	Inspección en consola de control	3	24	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Motor no alcanza la velocidad requerida	Caudal de agua insuficiente	7	Tensión baja, conexiones incorrectas, sobrecarga mecánica e hidráulica	1	Inspección en subestación	5	35	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrecorriente	El equipo no parte	8	Bobinado roto o quemado, terminal defectuoso, sobrecarga mecánica	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Falla por protección térmica	El equipo no parte	8	Sobrecarga, terminal mal calibrado, rodamiento en mal estado, desbalance entre las fases, falla de ventilación.	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Falla del estator	El equipo no parte	8	Agotamiento del bobinado del estator	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por comunicación	el equipo no responde a requerimientos de operación	6	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	1	Inspección en subestación	5	30	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Control eléctrico (panel)	El equipo no responde a requerimientos en terreno	5	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el panel de control primario	2	Inspección en estación de trabajo	6	60	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Desgaste de rodamientos internos	Vibraciones, nivel de ruido y temperatura elevada	7	Desalineamiento, Desbalanceo, Lubricación (exceso o escases), horas de funcionamiento excedidas.	1	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	42	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Electricista
Subsistema de soporte	Brindar soporte para posicionar el equipo	Inestabilidad o nulo soporte para posicionar el equipo	Rotura en la base metálica	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base metálica	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección del estado de la estructura metálica, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura en la base de hormigón	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base de hormigón	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección de la estructura de hormigón, adicionar material de ser necesario	Mecánico

Tabla B.7: AMFEC de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Bomba Flushing HLE				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce
Locación:		Planta de Tratamiento de Gases - Fundición Chagres				Departamento:		Mantenimiento		Fecha:		09-10-2018
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema de transporte agua de procesos	Transportar el agua de procesos desde la torre quench hasta los aspersores ubicados en la parte superior del precipitador con el fin de remover las partículas que estén adheridas a los electrodos de recolección	Cese del transporte de agua de procesos desde la torre quench hacia los aspersores del precipitador para realizar lavado de los electrodos de recolección	Rotura/deterioro de junta de expansión de admisión bomba flushing	Pérdida de presión de agua en línea flushing	6	Desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Rotura/deterioro de junta de expansión de descarga bomba flushing		6	Desgaste erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la junta, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de admisión línea de agua flushing		6	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico
			Rotura/deterioro de uniones enflanchadas de descarga línea de agua flushing	Filtración de agua de procesos	6	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de las uniones, reapretar o cambiar empaquetadura de ser necesario	Mecánico
			Daño en válvula check línea agua flusing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	2	Inspección en estación de trabajo	8	112	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico
			Daño en válvulas de línea de agua flushing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico
			Daño en válvulas de línea de agua flushing		7	Desgaste corrosivo / erosivo	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Hacer pruebas de válvulas / Cambiar actuador, de lo contrario cambiar válvula	Mecánico
			Desgaste, rotura o desprendimiento de partes del impulsor	Disminución o pérdida del caudal y presión en el proceso	8	Desgaste erosivo en el impulsor	2	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	96	Inspeccionar condición del impulsor mediante análisis de vibraciones, cambiar impulsor en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño deterioro sello mecánico	Filtración de fluido	8	Desgaste erosivo de material en el sello	1	Inspección visual en terreno	8	64	Inspeccionar condición del sello mecánico en caso de posible fuga	Mecánico
			Daño acople	Pérdida de transmisión entre motor y bomba, vibración del equipo	7	Desalineamiento excesivo, instalación incorrecta, falla de material, soldadura	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspección del estado del acoplamiento, reapretar o cambiar en caso de ser necesario	Mecánico
			Daño de la carcaza	Detención del equipo o disminución del caudal en el proceso	6	Desgaste erosivo en las paredes de la carcasa	1	Inspección visual en terreno	8	48	Inspeccionar estado de la carcasa en caso de una posible fuga	Mecánico
			Desgaste de rodamientos	Alza de temperaturam o fundición del rodamiento, Aumento de vibraciones	8	Falta de lubricación, lubricación inadecuada, desbalanceo, desalineamiento	1	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	48	Inspeccionar estado de los rodamientos mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Falla del sensor de presión	Indica una lectura incorrecta de presión	3	Fallo en el diafragma, mala instalación	1	Inspección en consola de control	3	9	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista

Subsistema eléctrico	Encargado de convertir la energía eléctrica en mecánica para transmitirla a la bomba	Motor es incapaz de transmitir el movimiento requerido	Motor eléctrico no gira	Bomba no gira (no hay transmisión mecánica)	8	Fuente alimentación defectuosa, bobinado roto o quemado, terminales mal conectados, eje bloqueado por rodamiento dañado.	1	Inspección en consola de control	3	24	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Motor no alcanza la velocidad requerida	Caudal de agua insuficiente	7	Tensión baja, conexiones incorrectas, sobrecarga mecánica e hidráulica	1	Inspección en subestación	5	35	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por sobrecorriente	El equipo no parte	8	Bobinado roto o quemado, terminal defectuoso, sobrecarga mecánica	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Falla por protección térmica	El equipo no parte	8	Sobrecarga, terminal mal calibrado, rodamiento en mal estado, desbalance entre las fases, falla de ventilación.	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Falla del estator	El equipo no parte	8	Agotamiento del bobinado del estator	1	Inspección en subestación	5	40	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Falla por comunicación	el equipo no responde a requerimientos de operación	6	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el sistema de control (lazos de control)	1	Inspección en subestación	5	30	Inspección de conexiones eléctricas, y conexiones en subestación	Electricista
			Control eléctrico (panel)	El equipo no responde a requerimientos en terreno	5	Deterioro o error de la conexión entre el equipo y el panel de control primario	1	Inspección en estación de trabajo	6	30	Inspección de conexiones eléctricas	Electricista
			Desgaste de rodamientos internos	Vibraciones, nivel de ruido y temperatura elevada	7	Desalineamiento, Desbalanceo, Lubricación (exceso o escases), horas de funcionamiento excedidas.	1	Inspección en estación de trabajo, mediante análisis de vibraciones	6	42	Inspeccionar mediante análisis de vibraciones, cambiar de ser necesario	Electricista
Subsistema de soporte	Brindar soporte para posicionar el equipo	Inestabilidad o nulo soporte para posicionar el equipo	Rotura en la base metálica	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base metálica	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección del estado de la estructura metálica, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura en la base de hormigón	Desalineamiento del equipo	4	Desgaste corrosivo / desgaste erosivo en la base de hormigón	1	Inspección visual en terreno	8	32	Inspección de la estructura de hormigón, adicionar material de ser necesario	Mecánico

ANEXO C

Registro de falla de los equipos

Tabla C.1: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.

Equipo	Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación (Wesp)		
Tag de Equipo	7122-2204-001		
Código Ellipse	PRHUMGHR		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Lavado del precipitador	16/10/2017	Precipitador y torre quench
2	Falla por comunicación	27/02/2018	Precipitador y torre quench
3	Reparación línea de rebalse	02/04/2018	Torre quench

Tabla C.2: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.

Equipo	Precipitador electrostático húmedo de hornos de limpieza de escoria (Wesp 1)		
Tag de Equipo	7222-2204-001		
Código Ellipse	PRHUMGHLE1		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Cambio junta exp. ducto de gases	20/11/2017	Ducto descarga de gases
2	Fuga en manhole ducto de descarga wesp 1	15/12/2017	Ducto descarga de gases
3	Falla por comunicación	27/02/2018	Precipitador y torre quench
4	Lavado del precipitador	24/04/2018	
5	Cambio motocompresores 2,3 y 4	07/05/2018	Sección precipitador
6	Falla por comunicación	11/05/2018	Precipitador y torre quench
7	Falla por comunicación	29/05/2018	Precipitador y torre quench

Tabla C.3: Registro de fallos en precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.

Equipo	Precipitador electrostático húmedo de hornos de limpieza de escoria (Wesp 2)		
Tag de equipo	7223-2204-001		
Código Ellipse	PRHUMGHLE2		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	11/07/2017	Precipitador
2	Lavado del precipitador	16/10/2017	Precipitador
3	Falla por comunicación	11/05/2018	Precipitador
4	Falla por comunicación	29/05/2018	Precipitador

Tabla C.4: Registro de fallos en ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.

Equipo	Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación (VTI-HR)		
Tag de equipo	7124-1840-001		
Código Ellipse	VENTVTIHR		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	23/01/2017	Ventilador
2	Falla por comunicación	14/11/2017	Ventilador
3	Lavado de rodete	13/12/217	Rodete
4	Cambio de grasa	30/07/2018	Descansos

Tabla C.5: Registro de fallos en ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.

Equipo	Ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria (VTI-HLE)		
Tag de equipo	7224-1840-001		
Código Ellipse	VENTVTIHLE		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	23/01/2017	Ventilador
2	Falla por comunicación	14/11/2017	Ventilador
3	Falla por comunicación	13/12/2017	Ventilador
4	Lavado de rodete	04/06/2018	Rodete
5	Cambio de grasa	30/07/2018	Descansos

Tabla C.6: Registro de fallos en bomba flushing de hornos de refinación.

Equipo	Bomba flushing de hornos de refinación		
Tag de equipo	7127-1550-004		
Código Ellipse	BBAFLREF		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Cambio válvula check	03/11/2017	Ducto descarga de bomba
2	Cambio sello mecánico	23/11/2017	Carcasa
3	Reparación fuga sello mecánico	29/11/2017	Carcasa
4	Falla por comunicación	08/03/2018	Bomba

Tabla C.7: Registro de fallos en bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.

Equipo	Bomba flushing de hornos de limpieza de escoria		
Tag de equipo	7227-1550-004		
Código Ellipse	BBAFLHLE		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	28/03/2017	Bomba
2	Falla por comunicación	17/10/2017	Bomba
3	Cambio válvula check	03/11/2017	Ducto descarga de bomba
4	Falla por comunicación	08/03/2018	Bomba

ANEXO D

Resultados para calcular parámetros de Weibull

Tabla D.1: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.

Equipo:	Precipitador Electrostático Húmedo HR							
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A={1/(1-F(t))}	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	6919	815	0,20588235	0,206	1,259445844	0,23067182	-1,46675928	6,70318811
2	3209	3209	0,5	0,5	2	0,69314718	-0,36651292	8,07371464
3	815	6919	0,79411765	0,794	4,854368932	1,57987911	0,45734833	8,84202653
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,88825918	-7,451884908	0,99692776						

Tabla D.2: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo N°1 de hornos de limpieza de escoria.

Equipo:	Precipitador Electrostático Húmedo 1 HLE							
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A=(1/(1-F(t)))	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	7765	72	0,09459459	0,095	1,104972376	0,09982034	-2,30438336	4,27666612
2	583	312	0,22972973	0,23	1,298701299	0,26136476	-1,34183828	5,74300319
3	1764	431	0,36486486	0,365	1,57480315	0,45413028	-0,78937116	6,06610809
4	1342	583	0,5	0,5	2	0,69314718	-0,36651292	6,36818719
5	312	1342	0,63513514	0,635	2,739726027	1,00785793	0,00782721	7,20191632
6	72	1764	0,77027027	0,77	4,347826087	1,46967597	0,38504195	7,47533924
7	431	7765	0,90540541	0,905	10,52631579	2,35387839	0,85606435	8,95738174
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,70797512	-5,168965112	0,97432941						

Tabla D.3: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de precipitador electrostático húmedo N°2 de hornos de limpieza de escoria.

Equipo:	Precipitador Electrostático Húmedo 2 HLE							
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A={1/(1-F(t))}	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	4602	431	0,15909091	0,159	1,189060642	0,17316362	-1,75351836	6,06610809
2	2325	2325	0,38636364	0,386	1,628664495	0,48776035	-0,71793108	7,75147532
3	4939	4939	0,61363636	0,614	2,590673575	0,95191791	-0,04927648	8,50491816
4	431	4602	0,84090909	0,841	6,289308176	1,83885108	0,60914096	8,43424627
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,83316919	-6,884289917	0,93712044						

Tabla D.4: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.

Equipo: Ventilador de Tiro Inducido HR								
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A=(1/(1-F(t)))	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	551	551	0,15909091	0,159	1,189060642	0,17316362	-1,75351836	6,31173481
2	7046	623	0,38636364	0,386	1,628664495	0,48776035	-0,71793108	6,43454652
3	623	5486	0,61363636	0,614	2,590673575	0,95191791	-0,04927648	8,60995467
4	5486	7046	0,84090909	0,841	6,289308176	1,83885108	0,60914096	8,86021536
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,66324614	-5,488132431	0,9000941						

Tabla D.5: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de ventilador de tiro inducido de hornos de limpieza de escoria.

Equipo: Ventilador de Tiro Inducido HLE								
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A=(1/(1-F(t)))	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	551	551	0,12962963	0,13	1,149425287	0,13926207	-1,97139774	6,31173481
2	7046	623	0,31481481	0,315	1,459854015	0,37833644	-0,97197142	6,43454652
3	623	1338	0,5	0,5	2	0,69314718	-0,36651292	7,19893124
4	4144	4144	0,68518519	0,685	3,174603175	1,15518264	0,14425846	8,32941678
5	1338	7046	0,87037037	0,87	7,692307692	2,04022083	0,71305805	8,86021536
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,85428399	-6,835253769	0,93574844						

Tabla D.6: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de refinación.

Equipo: Bomba Flushing HR								
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	A=(1/(1-F(t)))	B= Ln(A)	Y=Ln{Ln(A)} (Conocido Y)	X =Ln (t-T0) (Conocido X)
1	7358	135	0,15909091	0,159	1,189060642	0,17316362	-1,75351836	4,90527478
2	474	474	0,38636364	0,386	1,628664495	0,48776035	-0,71793108	6,16120732
3	135	2361	0,61363636	0,614	2,590673575	0,95191791	-0,04927648	7,76684054
4	2361	7358	0,84090909	0,841	6,289308176	1,83885108	0,60914096	8,90354344
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,5676843	-4,414342057	0,99048879						

Tabla D.7: Tabla de cálculo para parámetros de Weibull de bomba flushing de hornos de limpieza de escoria.

Bomba Flushing HLE								
Equipo:								
Orden de falla	Tiempo entre falla [h]	Tiempos ordenados	RM	F(xi)	$A=(1/(1-F(t)))$	$B= \ln(A)$	$Y=\ln\{\ln(A)\}$ (Conocido Y)	$X=\ln(t-T_0)$ (Conocido X)
1	2085	407	0,15909091	0,159	1,189060642	0,17316362	-1,75351836	6,00881319
2	4863	2085	0,38636364	0,386	1,628664495	0,48776035	-0,71793108	7,64252413
3	407	2991	0,61363636	0,614	2,590673575	0,95191791	-0,04927648	8,00336306
4	2991	4863	0,84090909	0,841	6,289308176	1,83885108	0,60914096	8,48941081
Pendiente β	Intersección b	Correlación R						
0,91016898	-7,336954973	0,97093436						

ANEXO E

Datos técnicos de equipos evaluados

Precipitador electrostático húmedo



Ilustración E.1: Precipitador electrostático húmedo de hornos de refinación.

Tabla E.1: Datos técnicos precipitador Wesp, Wesp 1 y Wesp 2.

Datos Técnicos			
Sección	Torre quench		
	HR	HLE	Unidades
Diámetro torre quench	3	3	[m]
Numero de boquillas	7	7	[unidades]
Volumen sumidero integrado	11	11	[m ³]
Eficiencia de eliminación de As	30	30	%
Eficiencia de eliminación de MP	30	30	%
Material carcasa torre quench	AISI 316L		
Sección	Precipitador		
	HR	HLE	Unidades
Altura electrodos de recolección	5,7	5,7	[m]
Diámetro precipitador	4,2	2x4,2	[m]
Cantidad de electrodos de recolección	62	2x62	[unidades]
Material electrodos de recolección	AISI 904L		
Superficie	432	2 x 432	[m ²]
Material de electros de descarga	Hastelloy C-276		

Material carcasa precipitador	AISI 316L		
Numero de boquillas agua flushing	8	8	[unidades]
Número de boquillas agua fogging	0	4	[unidades]
Altura total de la estructura	$\approx 23,8$		[m]
Rango de voltaje aplicado	0 - 60	0 - 80	[kV]
Rango de corriente aplicada	100 - 500	50 - 450	[mA]
Eficiencia del eliminación de As	92,8		%
Eficiencia de eliminación MP	88,9		%

Tabla E.2: Datos de diseño de precipitador Wesp y Wesp 1.

Datos de diseño del proceso			
Proceso	HR	HLE	Unidades
Caudal de entrada de gas	45.000	45.000	[Nm ³ /h] _{wet}
	30,2	22,0	m ³ /s
Temperatura del gas de entrada	350	180	°C
Presión del gas de entrada	-650	-800	Pa _g
Composición del gas de entrada			
SO ₂	0,15	0,2	Vol%
H ₂ O	4,5	3,5	Vol%
CO ₂	3,0	2,0	Vol%
O ₂	17	18	Vol%
N ₂	Balanceado	Balanceado	
Concentración de polvo			
Entrada	650	450	[mg/Nm ³] _{dry}
Salida	50	50	[mg/Nm ³] _{dry}
Eficiencia total de eliminación de polvo	92,3	88,7	%
Arsénico			
Entrada	20	600	[mg/Nm ³] _{dry}
Salida	1	1	[mg/Nm ³] _{dry}
Eficiencia total de eliminación de Arsénico	95,0	99,8	%
pH del fluido	2 - 3		

Ventilador de tiro inducido



Ilustración E.2: Ventilador de tiro inducido de hornos de refinación.

Tabla E.3: Características de ventiladores de tiro inducido hornos de refinación y limpieza de escoria.

Datos Técnicos		
Tipo		Ventilador Centrífugo
Fabricante		CBV
Motor		CBV
Material de la carcasa		AISI 316L
Material impulsor		AISI 316L
Diámetro del eje		85 [mm]
Material del eje		25CrMo4
Tipo de descanso	Lado fijo	SKF SNL520
	Lado libre	SKF SNL520
Monitoreo de vibraciones del rodamiento		Vibrocontrol 1000, e.g. Brüel&Kjaer
Monitoreo de temperatura de rodamiento		Pt100 sensor, 4-20 mA
Flujo volumétrico máximo		55.000 [Nm ³ /h] _{wet}
Temperatura del gas de entrada		60 °C
Temperatura de diseño mecánico		100 °C
Presión de entrada del gas		-18 [mbar]

Presión diferencial (estática)	20	[mbar]
Eficiencia	~ 82,6	%
Potencia del motor	75	[kW]
Velocidad máxima	1.500	[rpm]
Primera velocidad crítica	2.000	[rpm]
Nivel de presión del sonido a 1m	79 ± 4	[dB(A)]

Tabla E.4: Composición de los gases transportados.

Composición del Gas Transportado	
N ₂	62,1% (v/v)
O ₂	13,4% (v/v)
H ₂ O	22,5% (v/v)
CO ₂	2,0% (v/v)
CO	0,062% (v/v)

Bomba flushing



Ilustración E.3: Bomba flushing de hornos de refinación.

Tabla E.5: Datos técnicos de bombas flushing de hornos de refinación y limpieza de escoria.

Datos Técnicos		
Marca	Wernert-Pumpen	
Modelo	NEPO 125-100-200	
Fluido de trabajo	Agua de Procesos Torre Quench	
Caudal de trabajo	150	[m ³ /h]
Cabecal total de entrega	45,0	[m]
Motor	200 MLB [ABB]	
Potencia	37,0	[kW]
Velocidad de giro	2950	[rpm]
Diámetro de impulsor	Ø191/162	[mm]
Número de álabes	7	
Material impulsor	UHMW-PE+Ms58	
Dimensiones eje	Ø 55x517	[mm]
Material eje	42Cr Mo4	

Camisa del eje	Carbono (Resina sintética impregnada)	
Material sello mecánico	Carburo de Silicio (SiC)	
Material de la empaquetadura	FPM (Viton o Caucho Fluorado)	
Material de la carcasa	UHMW-PE	
Diámetro de succión	Ø 5	[in]
Diámetro de descarga	Ø 4	[in]

ANEXO F

Equipos críticos de la planta de
separación sólido / líquido

Listado de equipos de Planta de Separación Sólido/Líquido

Tabla F.1: Tag de los equipos en planta de separación sólido/líquido de hornos de refinación.

Planta separación sólido/líquido HR's	
Nombre de equipo	Tag asociado
Filtro separador lamella HR	7131 - 3300 - 001
Filtro prensa automático HR	7132 - 2200 - 001

Tabla F.2: Tag de los equipos en planta de separación sólido/líquido de hornos de limpieza de escoria.

Planta separación sólido/líquido HLE's	
Nombre de equipo	Tag asociado
Filtro separador lamella HLE	7231 - 3300 - 001
Filtro prensa automático N°1 HLE	7232 - 2200 - 001
Filtro prensa automático N°2 HLE	7232 - 2200 - 002

Equipos con criticidad asociada

Tabla F.3: Lista de los equipos y criticidad asociada de planta de separación sólido/líquido de hornos de refinación.

Planta separación sólido/líquido HR's								
Nombre de equipo	S/SO	IA	In/Dm	L y R	R/S/C	Probabilidad	Criticidad	
Filtro separador lamella HR	1	1	2	1	1	3	8	CB
Filtro prensa automático HR	1	1	2	1	1	2	8	CB

Tabla F.4: Lista de los equipos y criticidad asociada de planta de separación sólido/líquido de hornos de limpieza de escoria.

Planta separación sólido/líquido HLE's								
Nombre de equipo	S/SO	IA	In/D m	L y R	R/S/C	Probabilidad	Criticidad	
Filtro separador lamella HLE	1	1	1	1	1	2	2	CC
Filtro prensa automático N°1 HLE	1	1	2	1	1	3	8	CB
Filtro prensa automático N°2 HLE	1	1	2	1	1	3	8	CB

Filtro separador lamella

El filtro separador lamella es un equipo que genera la separación de sólidos presentes en agua.

El afluente ingresa al filtro, siendo mezclado con floculante y coagulante, de manera que al fluir hacia la parte inferior se encuentre con las ranuras laterales. El diseño en contracorriente reduce el riesgo de que se vuelvan a mezclar los sólidos ya decantados.

A medida que el líquido fluye hacia arriba, los sólidos se decantan sobre las placas paralelas inclinadas y paralelas, se deslizan en la tolva de lodo en la parte inferior. Gracias a esto, son conducidos al estanque espesador de lodos, donde es preparado para poder ser enviado a los filtro prensa correspondientes.

Cada filtro separador lamella se compone de los siguientes equipos:

- Estanque espesador de lodo con agitador.
- Tanque de floculación.
- Tanque mezcla rápida.
- Separador sólido/líquido tipo lamella.



Ilustración F.1: Filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

A continuación, se presentan los datos de proceso del equipo:

Tabla F.5: Datos técnicos del filtro separador lamella.

Datos técnicos		
Altura total	5.844	[mm]
Ancho total	4.573	[mm]
Diámetro estanque espesador	1.980	[mm]
Material	A-36	

Tabla F.6: Datos de procesos del filtro separador lamella.

Datos de proceso		
Fabricante	Parkson	
Modelo	LGST 360/55	
Tipo de operación	Continuo automático	
Tipo de exposición	Al aire libre	
Fluido de trabajo	Agua de procesos Torre Quench	
Flujo de diseño	6,5	[m ³ /h]
Flujo de trabajo	6,4	[m ³ /h]
Temperatura	63	°C
As (máximo)	15	[g/l]
H ₂ SO ₄	0,05 – 0,21	[g/l]
pH del fluido de trabajo	1,0 – 3,0	
Densidad del efluente	1.035	[kg/m ³]
Viscosidad dinámica a 63°C (Agua a 63°C aproximadamente)	0,000447	[kg/(m·s)]
Tasa de remoción de sólidos (base seca)	27,31	[kg/h]
Concentración de sólidos en la entrada	1-5	[g/l]
Tamaño de partículas	80% < 2,5	[µm]
Tamaño promedio de partículas	0,6	[µm]
Densidad específica de los sólidos	1.800	[kg/m ³]

Eficiencia de eliminación de sólidos	90	%
Composición de sólidos	50-55% Hollín + Precipitados metálicos y otros (Cu, Fe, Si,As, etc)	

Filtro Prensa Automático

Un filtro prensa es un separador de líquidos y sólidos a través de filtración por presión, el cual se compone principalmente de una serie de bastidores de acero que sostienen una tela o malla.

El lodo líquido es bombeado a las cámaras que se encuentran rodeadas por lonas filtrantes. Al bombear la presión se incrementa y el lodo es forzado a atravesar las lonas, provocando que los sólidos se acumulen y formen una pasta seca. Posteriormente, el pistón hidráulico empuja la placa de acero contra las placas de polietileno haciendo la prensa. El cabezal y el soporte terminal son sostenidos por rieles de las barras de soporte. El filtrado pasa a través de las lonas y es dirigido hacia los canales de las placas y puertos de drenado del cabezal para descarga.

Para remover la pasta compactada, se hace retroceder el pistón neumático, relajando la presión y separando cada una de las placas, para permitir que la pasta compactada caiga desde la cámara.



Ilustración F.2: Filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria

Tabla F.7: Datos de técnicos de equipo filtro prensa automático.

Datos técnicos		
Marca	Toro Equipment	
Modelo	FPA 80-15	
Presión máxima	200	[kg/cm²]
Presión filtrado	6 - 8	[kg/cm²]
Longitud total	3.566	[mm]
Anchura total	1.584	[mm]
Altura total	1.720	[mm]
Material del bastidor	Acero S234JR	
Longitud entre cabezales aproximadamente	2.051	[mm]
Brida entrada de agua / material	DN80	P.V.C.
Brida salida de agua / material	DN40	P.V.C.
Material ejes laterales	Acero S235JR con camisas AISI 304	
Número de ejes laterales	2	
Dispositivo de cierre y apertura		
Tipo de Cilindro	Cilindro hidráulico de doble efecto	
Carrera pistón	1.000	[mm]
Diámetro pistón	200	[mm]
Diámetro vástago	110	[mm]
Material pistón cilindro	Acero Inoxidable cromado	
Presión máxima de cierre admisible	200	[bar]
Grupo hidráulico		
Funcionamiento	Automático con bomba	
Caudal	27+5	[litros/min]
Potencia	4	[kW]
Depósito	75	[litros]
Paquete filtrante		
Tipo de placa filtrante	Cámara incorporada	

Tamaño	800 x 800	[mm]
N° de placas	15	
Espesor de placas	57-62	[mm]
Volumen	224	[litros]
Material Placas	Polipropileno	
Superficie filtrante	1,09	[m ²]
Superficie filtrante total	15,3	[m ²]
Material Tela filtrante	Polipropileno M-1040	
Tamaño de tela	800 x 800	[mm]
Motor		
Motor-reductor	Motovario NMRV-P075	
Potencia	0,75	[kW]
Velocidad	14	[rpm]

Análisis de Modo de Falla y Efectos Críticos de Equipos

Tabla F.8: AMFEC de filtro separador lamella de hornos de refinación.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Filtro Separador Sólido / Líquido Tipo Lamella HR				Gerencia:	Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta Separación Sólido/Líquido				Departamento:	Mantenimiento		Fecha:		10/9/2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema espesador de lodo	Espesar los lodos que se acumulan del proceso	Incapacidad de espesar los lodos	Desgaste / rotura en las paredes	Filtración de fluido	7	Desgaste del recubrimiento interno	2	Inspección visual en terreno	8	112	Revisión de la condición de las paredes y de las uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico
			Falla del agitador espesador de lodos	Incapacidad de espesar los lodos	8	Rotura, entramamiento del agitador, sobrecarga mecánica	1	Inspección visual en terreno	8	64	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	8	Entramamiento del reductor	1	Inspección visual en terreno	7	56	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor eléctrico		8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en consola de control	3	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la llegada del afluente al Filtro separador tipo Lamella	incapacidad transportar el afluente hacia el estanque flash mix	Obstrucción línea de efluente	Fluido no llega al Filtro separador tipo Lamella	8	Exceso de lodo	2	Inspección visual en terreno	8	128	Remoción del exceso de lodo	Mecánico
			Fallo del sensor de turbidez	Lectura errónea de la turbidez del fluido a trabajar	7	lodo demasiado oscuro, mala manipulación, bobina quemada	2	Inspección en estación de control	5	70	Revisar y calibrar en caso de ser necesario / Cambiar por uno compatible con la turbidez del fluido	Instrumentista
Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la mezcla homogénea de la soda cáustica con el afluente proveniente de la torre quench	incapacidad de mezclar la soda cáustica con el efluente proveniente de la torre quench	Desgaste / rotura de estanque mezcla rápida	Detención del equipo	9	Corrosión de las paredes	2		8	144	Inspección de las paredes y uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico
			Falla del agitador flash mix	Incapacidad de realizar una mezcla adecuada del afluente con la soda cáustica	8	Rotura, entramamiento del agitador, sobrecarga mecánica	1		8	64	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico
			Rotura ducto soda cáustica	Fuga de soda cáustica	9	Desgaste o rotura de la línea	1		8	72	Inspección de la condición del ducto, cambiar sección de ser necesario	Mecánico
			Falla del pH-metro	Indica una lectura errónea del pH	6	Mala manipulación, corte de las conexiones	2		5	60	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista

Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la mezcla homogénea de la soda cáustica con el afluente proveniente de la torre quench	incapacidad de mezclar la soda cáustica con el efluente proveniente de la torre quench	Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	8	Entrabamiento del reductor	1	6	48	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor eléctrico		8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	3	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema agitador de floculante	Permite la mezcla homogénea del floculante con el afluente proveniente del estanque flash mix	incapacidad de mezclar el floculante con el efluente proveniente del estanque flash mix	Rotura de estanque floculación	Detención del equipo	7	Corrosión del material	1	8	56	Inspección de las paredes y uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura ducto floculante	Fuga de líquido floculante	7	Desgaste o rotura de la línea	1	8	56	Inspección de la condición del ducto, cambiar sección de ser necesario	Mecánico
			Falla del agitador floculante	Incapacidad de realizar una mezcla adecuada del efluente con el floculante	8	Rotura o entrabamiento del agitador	1	5	40	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	7	Entrabamiento del reductor	1	3	21	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor eléctrico		7	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	3	21	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de separación y recirculación de clarificado	Brinda el soporte e inclinación para el decante de las partículas	Incapacidad de que las partículas decanten al fondo	Rotura de placas	Acumulación de sólidos entre las placas	5	Desgaste erosivo, desgaste corrosivo	1	8	40	Inspección de la condición de las placas cuando el equipo se encuentre detenido	Mecánico
	Transporte del clarificado hacia el estanque	Incapacidad de recirculación del fluido clarificado	Desgaste / rotura de la línea de clarificado	cese de fluido hacia el estanque	6	Desgaste erosivo, desgaste corrosivo	2	8	96	Inspección de la condición de la línea, cambiar sección de ser necesario	Mecánico

Tabla F.9: AMFEC de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)													
Equipo:		Filtro Separador Sólido /Líquido Tipo Lamella HLE				Gerencia:		Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta Separación Sólido/Líquido				Departamento:		Mantenición		Fecha:		10/9/2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad	
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección				
Subsistema espesador de lodo	Espesar los lodos que se acumulan del proceso	Incapacidad de espesar los lodos	Desgaste / rotura en las paredes	Filtración de fluido	7	Desgaste del recubrimiento interno	2	Inspección visual en terreno	8	112	Revisión de la condición de las paredes y de las uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Falla del agitador espesador de lodos	Incapacidad de espesar los lodos	8	Rotura, entramamiento del agitador, sobrecarga mecánica	1	Inspección visual en terreno	8	64	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico	
			Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	8	Entramamiento del reductor	1	Inspección visual en terreno	7	56	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico	
			Falla del motor eléctrico		8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en consola de control	3	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista	
Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la llegada del afluente al Filtro separador tipo Lamella	incapacidad transportar el afluente hacia el estanque flash mix	Obstrucción línea de efluente	Fluido no llega al Filtro separador tipo Lamella	8	Exceso de lodo	2	Inspección visual en terreno	8	128	Remoción del exceso de lodo	Mecánico	
			Fallo del sensor de turbidez	Lectura errónea de la turbidez del fluido a trabajar	7	lodo demasiado oscuro, mala manipulación, bobina quemada	2	Inspección en estación de control	5	70	Revisar y calibrar en caso de ser necesario / Cambiar por uno compatible con la turbidez del fluido	Instrumentista	
Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la mezcla homogenea de la soda cáustica con el afluente proveniente de la torre quench	incapacidad de mezclar la soda cáustica con el efluente proveniente de la torre quench	Desgaste / rotura de estanque mezcla rapida	Detención del equipo	9	Corrosión de las paredes	1		8	72	Inspección de las paredes y uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico	
			Falla del agitador flash mix	Incapacidad de realizar una mezcla adecuada del efluente con la soda cáustica	8	Rotura, entramamiento del agitador, sobrecarga mecánica	1		8	64	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico	
			Rotura ducto soda cáustica	Fuga de soda cáustica	9	Desgaste o rotura de la línea	1		8	72	Inspección de la condición del ducto, cambiar sección de ser necesario	Mecánico	

Subsistema de mezcla rápida (flash mix)	Permite la mezcla homogénea de la soda cáustica con el afluente proveniente de la torre quench	Incapacidad de mezclar la soda cáustica con el efluente proveniente de la torre quench	Falla del pH-metro	Indica una lectura errónea del pH	6	Mala manipulación, corte de las conexiones	2		5	60	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	8	Entrabamiento del reductor	1		6	48	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor eléctrico		8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1		3	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema agitador de floculante	Permite la mezcla homogénea del floculante con el afluente proveniente del estanque flash mix	Incapacidad de mezclar el floculante con el efluente proveniente del estanque flash mix	Rotura de estanque floculación	Detención del equipo	7	Corrosión del material	1		8	56	Inspección de las paredes y uniones del estanque, soldar de ser necesario	Mecánico
			Rotura ducto floculante	Fuga de líquido floculante	7	Desgaste o rotura de la línea	1		8	56	Inspección de la condición del ducto, cambiar sección de ser necesario	Mecánico
			Falla del agitador floculante	Incapacidad de realizar una mezcla adecuada del afluente con el floculante	8	Rotura o entrabamiento del agitador	1		5	40	Revisión del estado del agitador cada cierta cantidad de horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla de reductor de velocidad	Detención del equipo	7	Entrabamiento del reductor	1		3	21	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor eléctrico		7	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1		3	21	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de separación y recirculación de clarificado	Brinda el soporte e inclinación para el decante de las partículas	Incapacidad de que las partículas decanten al fondo	Rotura de placas	Acumulación de sólidos entre las placas	5	Desgaste erosivo, desgaste corrosivo	1		8	40	Inspección de la condición de las placas cuando el equipo se encuentre detenido	Mecánico
	Transporte del clarificado hacia el estanque	Incapacidad de recirculación del fluido clarificado	Desgaste / rotura de la línea de clarificado	cese de fluido hacia el estanque	6	Desgaste erosivo, desgaste corrosivo	2		8	96	Inspección de la condición de la línea, cambiar sección de ser necesario	Mecánico

Tabla F.10: AMFEC de filtro prensa automático de hornos de refinación.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Filtro Prensa Automático HR				Gerencia:	Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta Separación Sólido/Líquido				Departamento:	Mantenición		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema hidráulico	Generar presión para realizar el filtrado y la compactación de los sólidos	Incapacidad de generar la presión necesaria para el filtrado y la compactación de los sólidos	Falla del presostato hidráulico	Indica una lectura incorrecta de presión	8	bobina interna quemada	2	Inspección en estación de control	5	80	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Instrumentista
			Falla de la electroválvula	Detención del equipo	8	Falla del sensor, bobina interna quemada, suciedad en el circuito hidráulico	2	Inspección en estación de control	5	80	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Electricista / Instrumentista
			Falla de la bomba del conjunto hidráulico	Perdida de presión en el equipo	8	Suciedad en el circuito hidráulico	1	Inspección en estación de trabajo	7	56	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del depósito hidráulico	Fuga del líquido hidráulico	8	Mal ajuste o daño en pared del depósito	1	Inspección en estación de trabajo	8	64	Revisión de las uniones del depósito	Mecánico
			Obstrucción de filtros	Suciedad en el líquido hidráulico	5	Exceso de impurezas	1	Inspección visual en terreno	8	40	Cambiar filtros periódicamente	Mecánico
			Falla del motor del grupo hidráulico	Incapacidad de movilizar el líquido hidráulico	8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en estación de control	3	24	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de apertura y cierre	Encargado de propiciar la apertura y cierre del sistema	Incapacidad de propiciar la apertura o cierre del sistema	Falla del cilindro	Equipo no alcanza la presión necesaria para realizar el filtrado	8	Desgaste del émbolo (filtración interna), desgaste de material	1	Inspección en estación de trabajo	8	64	Inspeccionar estado del cilindro en busca de algún defecto	Mecánico
			Falla de las guías	Nulo o incorrecto desplazamiento durante apertura o cierre	8	Rotura/ deterioro/ soltura/ suciedad del riel	1	Inspección visual en terreno	8	64	Inspeccionar estado de las guías en busca de algún defecto	Mecánico
			Falla de los tensores entre placas	No se realiza la apertura	8	Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	64	Inspección del estado de los tensores, cambiar de ser necesario	Mecánico

Subsistema de filtrado	Encargado de separar el líquido de los sólidos filtrados	No es posible separar el líquido de los sólidos filtrados	Rotura de la tela filtrante	Fuga de líquidos al contenedor de sólidos	7	Desgaste en las telas, exceso de presión	2	Inspección visual en terreno	8	112	Inspeccionar estado de las telas, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Cilindro sacudidor de tortas	Acumulación de material en las telas	8	Corte del eje o de dientes	2	Inspección visual en terreno	8	128	Inspeccionar estado del cilindro en busca de algún defecto	Mecánico
			Cuñas	No se realiza la remoción de tortas	7	Sobreesfuerzo del material, fatiga de material	2	Inspección visual en terreno	8	112	Inspeccionar estado de las cuñas en busca de algún defecto, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Falla del reductor de velocidad	Detención del equipo	8	Entrabamiento del reductor	1	Inspección visual en terreno	8	64	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor sacudidor de tortas	No realiza la remoción de los sólidos	8	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en estación de trabajo	6	48	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista

Tabla F.11: AMFEC de filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria.

Análisis de Modos de Falla y Efectos Críticos (AMFEC)												
Equipo:		Filtro Prensa Automático HLE				Gerencia:	Operaciones		Elaborado por:		Miguel Angel Aguirre Ponce	
Locación:		Planta Separación Sólido/Líquido				Departamento:	Mantenición		Fecha:		09-10-2018	
Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de la falla	Severidad	Causa(s) de la falla	Proceso actual			NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad
							Ocurrencia	Controles de detección	Detección			
Subsistema hidráulico	Generar presión para realizar el filtrado y la compactación de los sólidos	Incapacidad de generar la presión necesaria para el filtrado y la compactación de los sólidos	Falla del presostato hidráulico	Detención del equipo	7	Falla del sensor, bobina interna quemada	1	Inspección en estación de trabajo	5	35	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Electricista
			Falla de la electroválvula	Detención del equipo	7	Falla del sensor, bobina interna quemada, suciedad en el circuito hidráulico	1	Inspección en estación de trabajo	5	35	Revisar y calibrar en caso de ser necesario	Electricista / Instrumentista
			Falla de la bomba del conjunto hidráulico	Pérdida de presión en el equipo	7	Exceso de presión, suciedad en el circuito hidráulico	1	Inspección en estación de trabajo	7	49	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del depósito hidráulico	Fuga del líquido hidráulico	7	Mal ajuste o daño en pared del depósito	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Revisión de las uniones del depósito	Mecánico
			Obstrucción de filtros	Suciedad en el líquido hidráulico	5	Exceso de impurezas	1	Inspección visual en terreno	8	40	Cambiar filtros periódicamente	Mecánico
			Falla del motor del grupo hidráulico	Incapacidad de movilizar el líquido hidráulico	7	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en estación de control	3	21	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista
Subsistema de apertura y cierre	Encargado de propiciar la apertura y cierre del sistema	Incapacidad de propiciar la apertura o cierre del sistema	Falla del cilindro	Equipo no alcanza la presión necesaria para realizar el filtrado	7	Desgaste del émbolo (filtración interna), desgaste de material	1	Inspección en estación de trabajo	8	56	Inspeccionar estado del cilindro en busca de algún defecto	Mecánico
			Falla de las guías	Nulo o incorrecto desplazamiento durante apertura o cierre	7	Rotura/ deterioro/ soltura/ suciedad del riel	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspeccionar estado de las guías en busca de algún defecto	Mecánico
			Falla de los tensores entre placas	No se realiza la apertura	7	Fatiga de material	1	Inspección visual en terreno	8	56	Inspección del estado de los tensores, cambiar de ser necesario	Mecánico

Subsistema de filtrado	Encargado de separar el líquido de los sólidos filtrados	No es posible separar el líquido de los sólidos filtrados	Rotura de la tela filtrante	Fuga de líquidos al contenedor de sólidos	6	Desgaste en las telas, exceso de presión	2	Inspección visual en terreno	8	96	Inspeccionar estado de las telas, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Cilindro sacudidor de tortas	Acumulación de material en las telas	7	Corte del eje o de dientes	2	Inspección visual en terreno	8	112	Inspeccionar estado del cilindro en busca de algún defecto	Mecánico
			Cuñas	No se realiza la remoción de tortas	7	Sobreesfuerzo del material, fatiga de material	2	Inspección visual en terreno	8	112	Inspeccionar estado de las cuñas en busca de algún defecto, cambiar de ser necesario	Mecánico
			Falla del reductor de velocidad	Detención del equipo	7	Entrabamiento del reductor	1	Inspección visual en terreno	8	56	Revisión cada ciertas horas de funcionamiento	Mecánico
			Falla del motor sacudidor de tortas	No realiza la remoción de los sólidos	7	Fuente de alimentación defectuosa, conexiones incorrectas, terminales quemados, bobinado quemado	1	Inspección en estación de trabajo	6	42	Revisión de las conexiones eléctricas	Electricista

Registro de falla de los equipos

Tabla F.12: Registro de falla en filtro separador lamella de hornos de refinación.

Equipo	Filtro separador lamella de hornos de refinación		
Tag de Equipo	7131-3300-001		
Código Ellipse	FISLIQLAM1		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	28/03/2017	Control del equipo
2	Reparación por fuga	05/09/2017	Estanques
3	Falla por comunicación	25/09/2017	Control del equipo
4	Lavado de estanque	24/10/2017	Espesador
5	Reparación por fuga	03/11/2017	Estanques
6	Fabricación y montaje de by-pass	06/11/2017	Filtro
7	Reparación de línea de traspaso entre estanques	15/12/2017	Estanques
8	Falla por comunicación	08/03/2017	Control del equipo
9	Reparación por fuga	09/04/2017	Estanques
10	Reparación por fuga	24/04/2018	Estanques
11	Ph reemplazo	26/07/2018	Instrumentación

Tabla F.13: Registro de falla en filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

Equipo	Filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria		
Tag de Equipo	7231-3300-001		
Código Ellipse	FISLIQLAM2		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Falla por comunicación	28/03/2017	Control del equipo
2	Reparación por fuga	23/10/2017	Estanques
3	Fabricación y montaje de by-pass	06/11/2017	Estanques
4	Reparación por fuga	11/12/2017	Estanques
5	Reparación por fuga	13/12/2017	Estanques
6	Reparación por fuga	14/02/2018	Estanques
7	Ph reemplazo	14/03/2018	Instrumentación
8	Modificación piping de turbidez	26/03/2018	Estanques
9	Fabricación de línea de clarificado	02/05/2018	Estanques
10	Falla por comunicación	11/05/2018	Control del equipo
11	Reparación de línea de traspaso entre estanques	08/06/2018	Estanques

Tabla F.14: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de refinación.

Equipo	Filtro prensa automático de hornos de refinación		
Tag de Equipo	7132-2200-001		
Código Ellipse	FILPRAUT		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Reparación protección descarga	12/01/2017	Filtro prensa
2	Falla por comunicación	22/05/2017	Control del equipo
3	Motor eléctrico estanque floculante	23/03/2018	Filtro prensa
4	Modificación tolvin recepción de lodos	16/04/2018	Filtro prensa
5	Rotura eje sacudidor torta	07/05/2018	Placas filtrantes
6	Falla por comunicación	11/05/2018	Control del equipo
7	Cambio de telas filtrantes	29/08/2018	Placas filtrantes

Tabla F.15: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°1.

Equipo	Filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°1		
Tag de Equipo	7232-2200-001		
Código Ellipse	FILPREAUT1		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Cambio válvula línea	29/06/2017	Filtro prensa
2	Rotura eje sacudidor de torta	17/11/2018	Placas filtrantes
3	Falla por comunicación	11/05/2018	Control del equipo
4	Fallo switch de presión	08/06/2018	Grupo Hidráulico
5	Cambio de telas filtrantes	13/07/2018	Placas filtrantes

Tabla F.16: Registro de falla en filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°2.

Equipo	Filtro prensa automático de hornos de limpieza de escoria N°2		
Tag de Equipo	7232-2200-002		
Código Ellipse	FILPREAUT2		
N° de falla	Descripción	Fecha	Sección Comprometida
1	Rotura eje sacudidor de tortas	18/03/2018	Placas filtrantes
2	Daño sensor sacudidor de tortas	05/04/2018	Placas filtrantes
3	Cambio telas filtrantes	09/07/2018	Placas filtrantes
4	Cambio telas filtrantes	21/09/2018	Placas filtrantes

Calculo de confiabilidad para los equipos

- Filtro separador lamella de hornos de refinación

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla F.17: Parámetros de Weibull de filtro separador lamella de hornos de refinación.

β	0.924204821
η	1.341.102777
γ	0
MTBF	1.391.382594

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,9243$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 1.391 [h], lo cual es un tiempo entre fallas que debe ser mejorado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla F.17, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla 4.18).

Tabla F.18: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro separador lamella de hornos de refinación.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,97601	0,02398	0,00093
72	0,93518	0,06481	0,00086
144	0,88059	0,1194	0,00081
216	0,83113	0,16886	0,00079
288	0,7856	0,21439	0,00077
360	0,74336	0,25663	0,00076
432	0,70398	0,29601	0,00075
504	0,66714	0,33285	0,00074
576	0,6326	0,36739	0,00073
648	0,60015	0,39984	0,00072

720	0,56961	0,43038	0,00072
792	0,54085	0,45914	0,00071
864	0,51371	0,48628	0,00071
936	0,4881	0,51189	0,0007
1008	0,46391	0,53608	0,0007
1080	0,44103	0,55896	0,0007
1152	0,41939	0,5806	0,00069
1224	0,3989	0,60109	0,00069
1296	0,3795	0,62049	0,00069
1398	0,35375	0,64624	0,00068
1440	0,3437	0,65629	0,00068
1512	0,32718	0,67281	0,00068
1584	0,31151	0,68848	0,00068
1656	0,29664	0,70335	0,00067
1728	0,28252	0,71747	0,00067
1800	0,26912	0,73087	0,00067
1872	0,25639	0,7436	0,00067
1944	0,2443	0,75569	0,00067
2016	0,23281	0,76718	0,00066
2088	0,22189	0,7781	0,00066
2160	0,21151	0,78848	0,00066

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración F.3 y F.4).

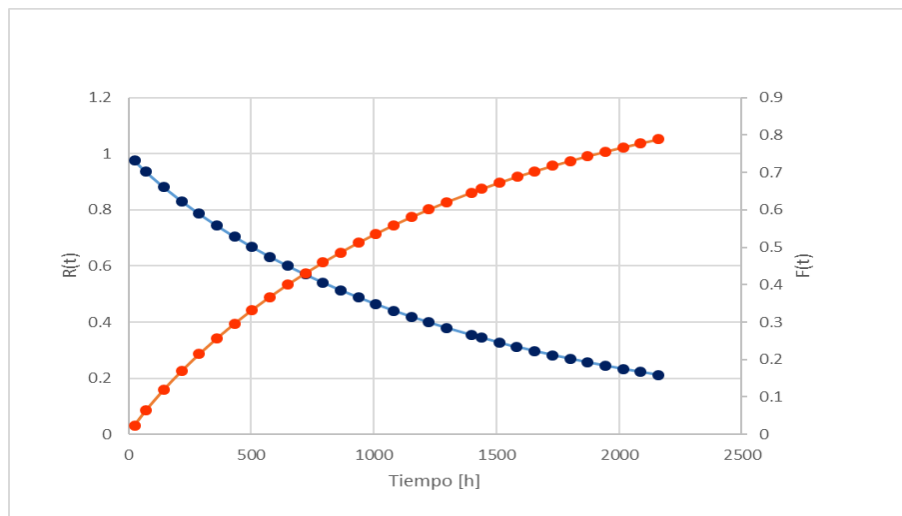


Ilustración F.3: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de refinación.

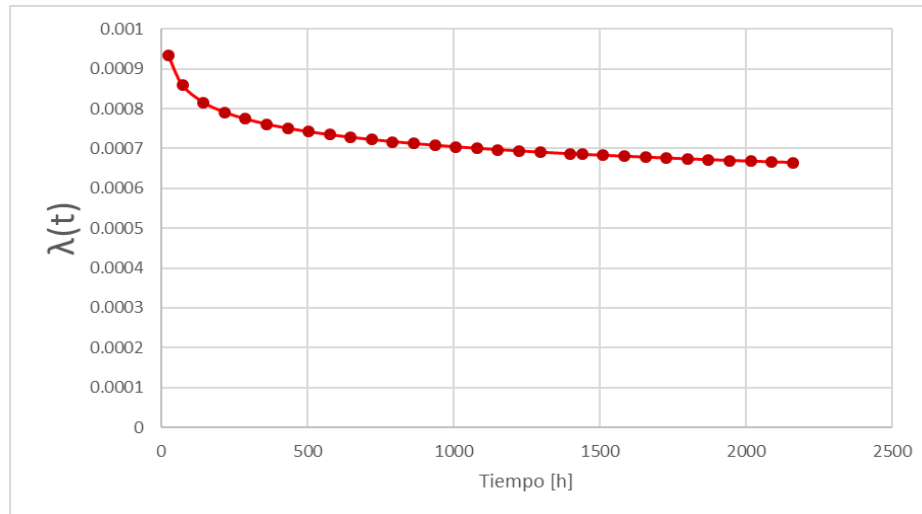


Ilustración F.4: Tasa de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de refinación.

Como se puede observar en la Tabla F.18, la confiabilidad del filtro separador lamella de hornos de refinación hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,56961** lo cual refleja que el equipo llega con una condición que necesita ser mejorada. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 56,9\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

- **Medidas Correctivas**

MPA 122 (*Mensual*)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.

MPA 123 (*Semestral*)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.

MPA 124 (*Anual*)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.
- Retiro y limpieza de placas inclinadas

Recomendación:

- Implementar las pautas de instrumentación (sin designación aún), que fueron creadas durante este proceso por el departamento respectivo.
- Creación de pauta de mantenimiento predictivo para medición de espesores en estanque espesador de lodos.

- **Filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria**

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla F.19: Parámetros de Weibull de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

β	0.855573053
η	1115.852964
γ	0
MTBF	1209.091114

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,8556$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 1.209 [h], lo cual es un tiempo entre fallas que necesita ser mejorado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla F.19, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla F.20).

Tabla F.20: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,96324	0,03675	0,00133
72	0,90859	0,0914	0,00113
144	0,84075	0,15924	0,00103
216	0,7824	0,21759	0,00097
288	0,73061	0,26938	0,00093
360	0,68393	0,31606	0,0009
432	0,64145	0,35854	0,00087
504	0,60253	0,39746	0,00086
576	0,56669	0,4333	0,00084
648	0,53358	0,46641	0,00082
720	0,50288	0,49711	0,00081

792	0,47435	0,52564	0,0008
864	0,44778	0,55221	0,00079
936	0,42299	0,577	0,00078
1008	0,39983	0,60016	0,00077
1080	0,37815	0,62184	0,00077
1152	0,35784	0,64215	0,00076
1224	0,33879	0,6612	0,00075
1296	0,3209	0,67909	0,00075
1398	0,29738	0,70261	0,00074
1440	0,28827	0,71172	0,00073
1512	0,27339	0,7266	0,00073
1584	0,25936	0,74063	0,00072
1656	0,24614	0,75385	0,00072
1728	0,23368	0,76631	0,00071
1800	0,22191	0,77808	0,00071
1872	0,21079	0,7892	0,00071
1944	0,2003	0,79969	0,0007
2016	0,19037	0,80962	0,0007
2088	0,18099	0,819	0,0007
2160	0,17211	0,82788	0,00069

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración F.5 y F.6).

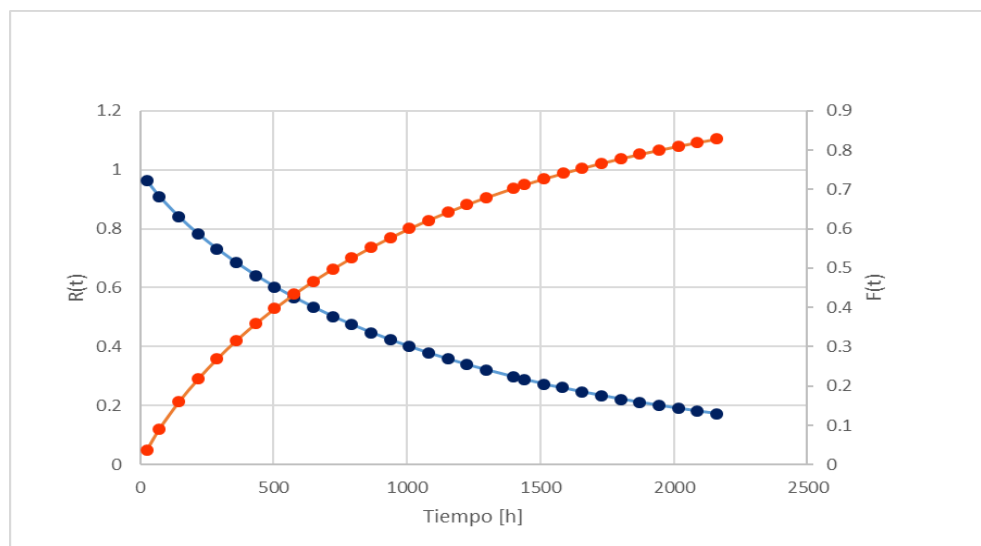


Ilustración F.5: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

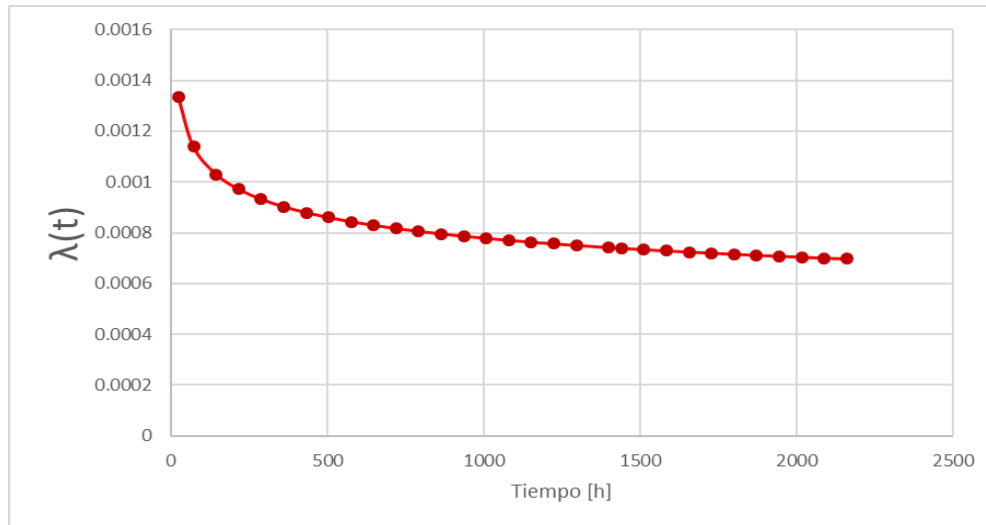


Ilustración F.6: Tasa de falla vs tiempo de filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria.

Como se puede observar en la Tabla F.20, la confiabilidad del filtro separador lamella de hornos de limpieza de escoria hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,5029** lo cual refleja que el equipo llega con una condición que necesita ser mejorada. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 50,3\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

- **Medidas Correctivas**

MPA 122 (Mensual)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.

MPA 123 (Semestral)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.

MPA 124 (Anual)

- Revisión interna del estado de estanque espesador de lodos.
- Revisión del estado de estanque flash mix.
- Revisión del estado de estanque floculante.
- Retiro y limpieza de placas inclinadas

Recomendación:

- Implementar las pautas de instrumentación (sin designación aún), que fueron creadas durante este proceso por el departamento respectivo.
- Creación de pauta de mantenimiento predictivo para medición de espesores en estanque espesador de lodos.

- **Filtro prensa automático de hornos de refinación**

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla F.21: Parámetros de Weibull de filtro prensa automático de hornos de refinación.

β	0.661889497
η	1324.916947
γ	0
MTBF	1774.775354

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,6619$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 1.774 [h], lo cual es un tiempo entre fallas que necesita ser mejorado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla F.21, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla F.22).

Tabla F.22: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático de hornos de refinación.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,9321	0,06789	0,00193
72	0,8646	0,13539	0,00133
144	0,79439	0,2056	0,00105
216	0,74005	0,25994	0,00092
288	0,69477	0,30522	0,00083
360	0,65564	0,34435	0,00077
432	0,62109	0,3789	0,00072
504	0,59011	0,40988	0,00069
576	0,56204	0,43795	0,00066
648	0,53639	0,4636	0,00063

720	0,51279	0,4872	0,00061
792	0,49097	0,50902	0,00059
864	0,47069	0,5293	0,00057
936	0,45179	0,5482	0,00056
1008	0,4341	0,56589	0,00054
1080	0,4175	0,58249	0,00053
1152	0,40188	0,59811	0,00052
1224	0,38716	0,61283	0,00051
1296	0,37325	0,62674	0,0005
1398	0,3548	0,64519	0,00049
1440	0,3476	0,65239	0,00048
1512	0,33575	0,66424	0,00047
1584	0,32449	0,6755	0,00047
1656	0,31377	0,68622	0,00046
1728	0,30355	0,69644	0,00045
1800	0,29379	0,7062	0,00045
1872	0,28448	0,71551	0,00044
1944	0,27558	0,72441	0,00043
2016	0,26706	0,73293	0,00043
2088	0,2589	0,74109	0,00042
2160	0,25108	0,74891	0,00042

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración F.7 y F.8).

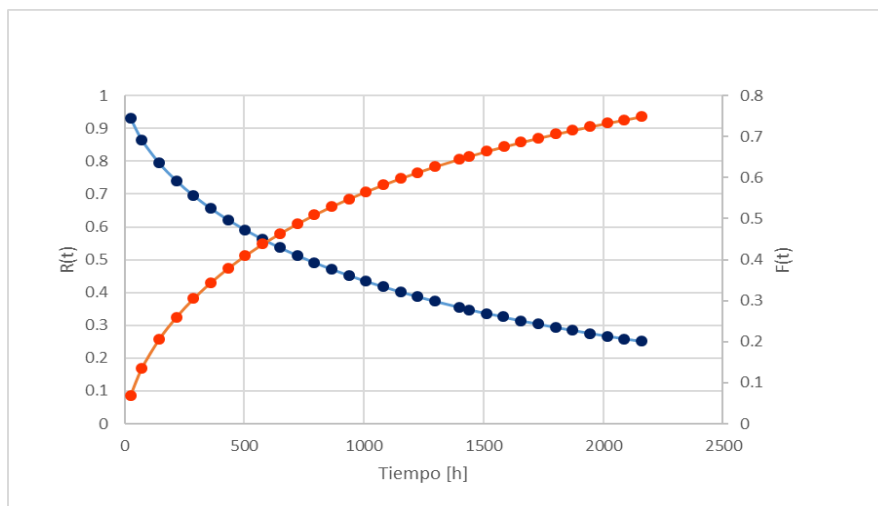


Ilustración F.7: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro prensa automático de hornos de refinación.

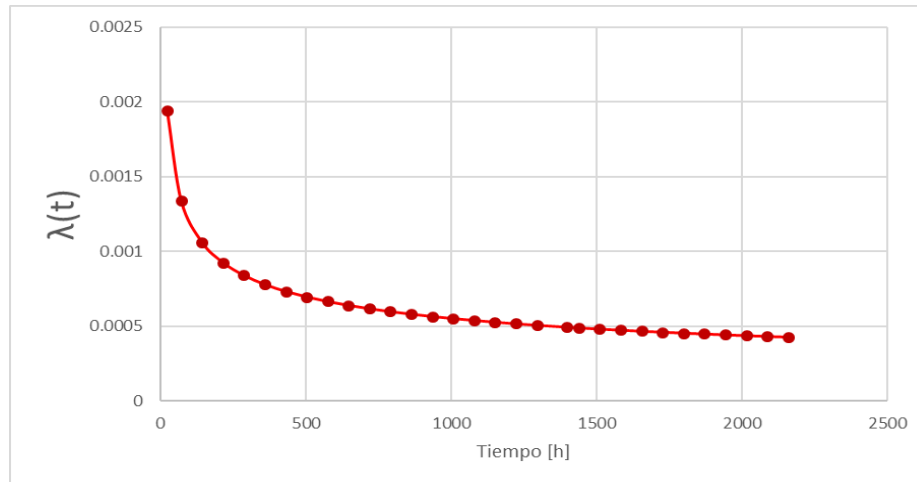


Ilustración F.8: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático de hornos de refinación.

Como se puede observar en la Tabla F.22, la confiabilidad del filtro prensa automático de hornos de refinación hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,51279** lo cual refleja que el equipo llega con una condición que necesita ser mejorada. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 51,3\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes a través de la incorporación de una serie de medidas correctivas, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC (ver Anexo B), el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados para la optimización.

- **Medidas Correctivas**

MPA 121 (*Mensual*)

- Revisión de los tensores entre placas.
- Revisión de las guías.
- Revisión del estado de las telas filtrantes.
- Revisión del cilindro sacudidor de tortas, inspeccionar radios en búsqueda de grietas.

Recomendación:

- Mandar 1 o más ejes del sistema sacudidor de tortas a analizar por falla mecánica (fatiga). Ya que todos los filtros prensa presentaron problemas de la misma magnitud.
- Implementar las pautas de instrumentación (sin designación aún), que fueron creadas durante este proceso por el departamento respectivo.

- **Filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria**

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla F.23: Parámetros de Weibull en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.

β	1.00072578
η	4248.547464
γ	0
MTBF	4241.904079

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de vida útil, ya que su $\beta \approx 1.000$ ($\beta \approx 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas son causadas por operaciones indebidas en los equipos, sobrecarga en la capacidad de producción cambios constantes en las condiciones de funcionamiento, etc.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 4.242 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla F.23, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla F.24).

Tabla F.24: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,99452	0,00547	0,00022
72	0,98365	0,01634	0,00022
144	0,96756	0,03243	0,00022
216	0,95172	0,04827	0,00022
288	0,93614	0,06385	0,00022
360	0,92082	0,07917	0,00022
432	0,90574	0,09425	0,00022
504	0,8909	0,10909	0,00022
576	0,87631	0,12368	0,00022
648	0,86196	0,13803	0,00022
720	0,84784	0,15215	0,00022
792	0,83395	0,16604	0,00022
864	0,82028	0,17971	0,00022

936	0,80684	0,19315	0,00022
1008	0,79362	0,20637	0,00022
1080	0,78062	0,21937	0,00022
1152	0,76782	0,23217	0,00022
1224	0,75524	0,24475	0,00022
1296	0,74286	0,25713	0,00022
1398	0,72567	0,27432	0,00022
1440	0,71871	0,28128	0,00022
1512	0,70693	0,29306	0,00022
1584	0,69534	0,30465	0,00022
1656	0,68394	0,31605	0,00022
1728	0,67273	0,32726	0,00022
1800	0,6617	0,33829	0,00022
1872	0,65086	0,34913	0,00022
1944	0,64019	0,3598	0,00022
2016	0,62969	0,3703	0,00022
2088	0,61937	0,38062	0,00022
2160	0,60921	0,39078	0,00022

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustración F.9 y F.10).

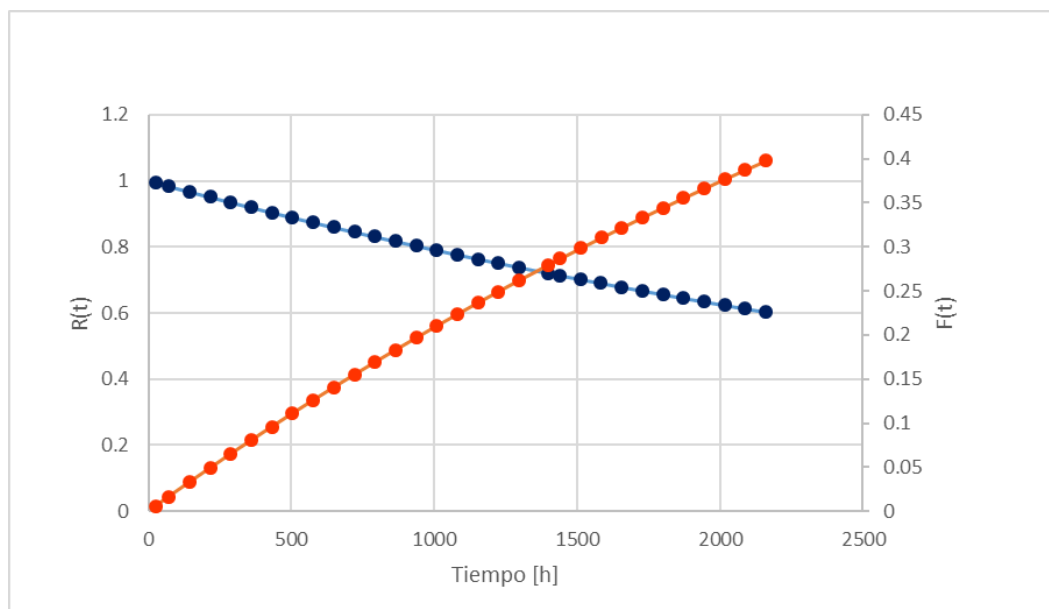


Ilustración F.9: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.

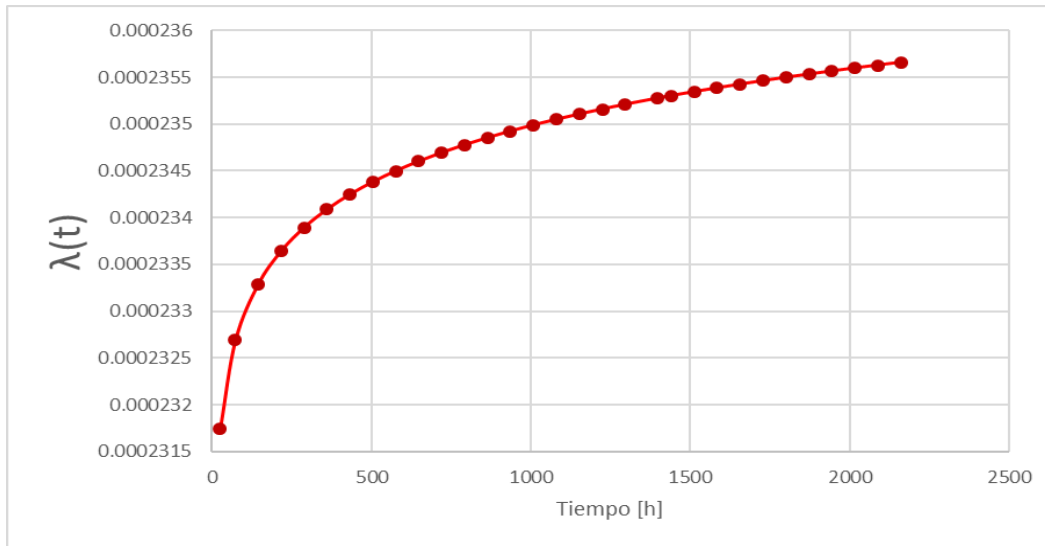


Ilustración F.10: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria.

Como se puede observar en la Tabla F.24, la confiabilidad del filtro prensa automático N°1 de hornos de limpieza de escoria hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,84505** lo cual refleja que el equipo llega en una excelente condición. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 84,5\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de un mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC, el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados.

- **Medidas Correctivas**

MPA 125 (*Mensual*)

- Revisión de los tensores entre placas.
- Revisión de las guías.
- Revisión del estado de las telas filtrantes.
- Revisión del cilindro sacudidor de tortas, inspeccionar radios en búsqueda de grietas.

Recomendación:

- Mandar 1 o más ejes del sistema sacudidor de tortas a analizar por falla mecánica (fatiga). Ya que todos los filtros prensa presentaron problemas de la misma magnitud.
- Implementar las pautas de instrumentación (sin designación aún), que fueron creadas durante este proceso por el departamento respectivo.

- **Filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias**

Mediante el método descrito en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2 se procede a calcular los parámetros de la distribución de Weibull, quedando de la siguiente manera:

Tabla F.25: Parámetros de Weibull en filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.

β	0.744851511
η	3.923.144802
γ	0
MTBF	4.697.835507

Dado el resultado anterior, es posible catalogar el equipo en etapa de rodaje, ya que su $\beta \approx 0,7446$ ($\beta < 1$). En base a lo anterior podemos decir que sus fallas fueron producto de defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados o calidad deficiente en elementos y repuestos.

Además, su MTBF tiene un valor ≈ 4.698 [h], lo cual es un tiempo entre fallas, holgado.

Por lo tanto, al ocupar los datos obtenidos en la Tabla F.25, es posible modelar la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla conforme pasan las horas de operación (ver Tabla F.26).

Tabla F.26: Función de confiabilidad, función de distribución acumulada de falla y tasa de falla de filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.

Tiempo [h]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
24	0,97779	0,0222	0,00069
72	0,95037	0,04962	0,00052
144	0,91823	0,08176	0,00044
216	0,89103	0,10896	0,00039
288	0,8668	0,13319	0,00036
360	0,84468	0,15531	0,00034
432	0,8242	0,17579	0,00033
504	0,80504	0,19495	0,00032
576	0,78698	0,21301	0,0003
648	0,76989	0,2301	0,0003
720	0,75362	0,24637	0,00029
792	0,7381	0,26189	0,00028
864	0,72325	0,27674	0,00027

936	0,70899	0,291	0,00027
1008	0,69529	0,3047	0,00026
1080	0,68209	0,3179	0,00026
1152	0,66936	0,33063	0,00025
1224	0,65706	0,34293	0,00025
1296	0,64517	0,35482	0,00025
1398	0,62896	0,37103	0,00024
1440	0,6225	0,37749	0,00024
1512	0,61167	0,38832	0,00024
1584	0,60116	0,39883	0,00023
1656	0,59095	0,40904	0,00023
1728	0,58102	0,41897	0,00023
1800	0,57136	0,42863	0,00023
1872	0,56196	0,43803	0,00022
1944	0,5528	0,44719	0,00022
2016	0,54388	0,45611	0,00022
2088	0,53518	0,46481	0,00022
2160	0,52669	0,4733	0,00022

Con los valores obtenidos es posible mostrar gráficamente el comportamiento de la confiabilidad, la función de distribución acumulada de falla y la tasa de falla (ver Ilustraciones F.11 y F.12).

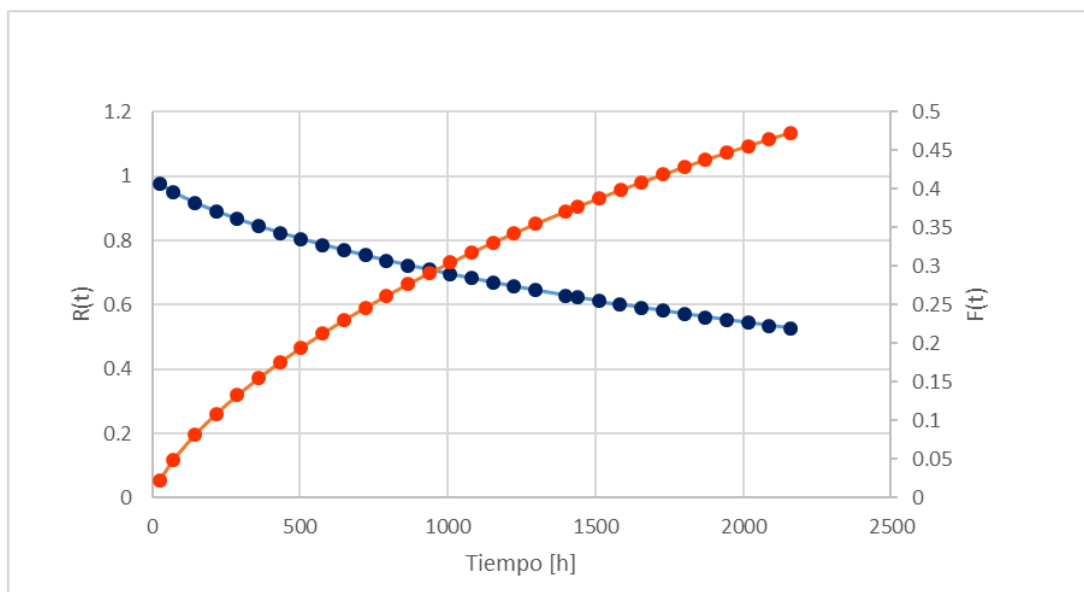


Ilustración F.11: Función de confiabilidad y Función de distribución acumulada de falla vs tiempo de filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.

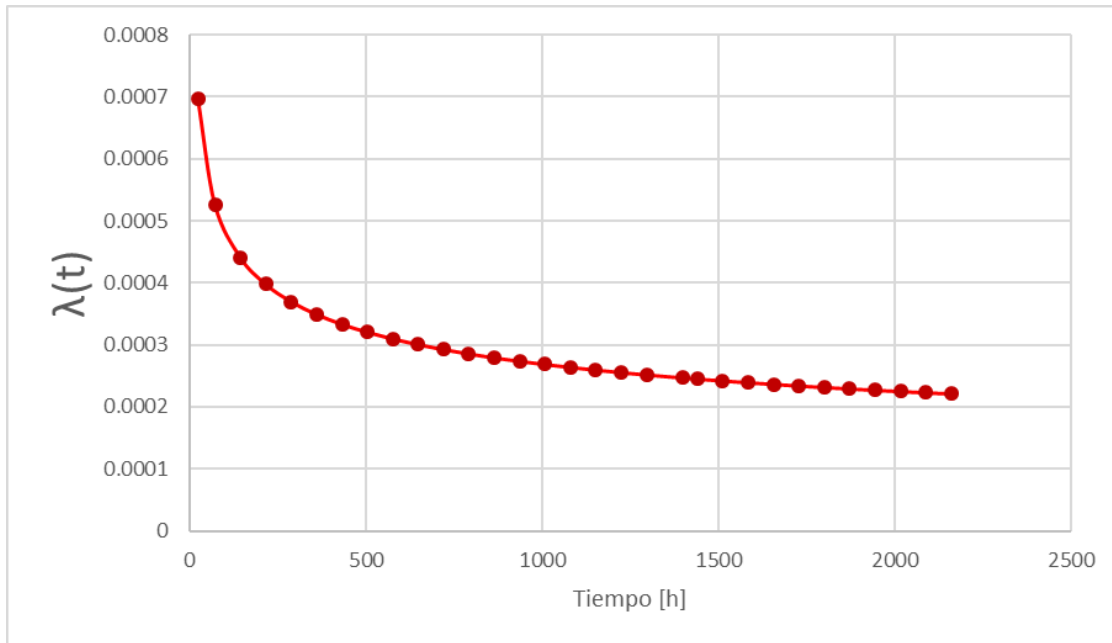


Ilustración F.12: Tasa de falla vs tiempo en filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escorias.

Como se puede observar en la Tabla F.26, la confiabilidad del filtro prensa automático N°2 de hornos de limpieza de escoria hasta la pauta mensual corresponde a un valor de **0,75362** lo cual refleja que el equipo llega con una excelente confiabilidad. En otras palabras, se puede decir que llega con un $\approx 77,1\%$ de probabilidad de no fallar al momento de realizar la pauta mensual.

En base a lo anterior se decide la estrategia de un mantenimiento preventivo con el fin de potenciar las pautas existentes, a fin de elevar el valor de confiabilidad o en el peor de los casos mantenerla. Para ello se considera lo arrojado por el AMFEC, el cual revela ciertos parámetros que son obviados en las pautas y que han de ser considerados.

- **Medidas Correctivas**

MPA 125 (*Mensual*)

- Revisión de los tensores entre placas.
- Revisión de las guías.
- Revisión del estado de las telas filtrantes.
- Revisión del cilindro sacudidor de tortas, inspeccionar radios en búsqueda de grietas.

Recomendación:

- Mandar 1 o más ejes del sistema sacudidor de tortas a analizar por falla mecánica (fatiga). Ya que todos los filtros prensa presentaron problemas de la misma magnitud.
- Implementar las pautas de instrumentación (sin designación aún), que fueron creadas durante este proceso por el departamento respectivo.

ANEXO G

Contingencia en Operación de las Plantas
de tratamiento de Gases HR – HLE y
Planta de Separación Sólido / Líquido

Condiciones Especiales de Operación Sistema de Tratamiento de Gases HR's y HLE's

Durante el proceso de operación de los sistemas de limpieza de gases HR's y HLE's, podrían presentarse alteraciones de la condición de normalidad, los cuales pueden ser por falla de los equipos que la componen o por problemas externos al sistema.

Los tipos de contingencia previstos se detallan a continuación:

Contingencia en Área de Manejo de Gases y Tratamiento de Gases

Cuando una contingencia requiere que los HR's y HLE's se “bajen” automáticamente, es decir, que los hornos se giren de forma que las toberas queden fuera del baño y la boca de los gases fuera de la campana permitiendo que la interrupción de la captura de gases, Este proceso se denominará “Operación de Emergencia HR's y HLE's”.

Dichos eventos pueden ser producidos por:

- Black Out en general de Fundición o PTG HR's/HLE's
- Falla en VTI (detención)
- Mantenciones no programadas que requieren la detención del sistema de transporte de gases como: intervenciones en el tren de gases, torre quench, Wesp's, VTI, además de la necesidad de desacoplar el tren de gases HLE's, el cual ocurrirá ante a una falla en el sistema de limpieza de gases de los HR's que implique una detención prolongada de la misma.
- Interrupción del suministro de agua a la PTG.

Un caso puntual que afecta al sistema de transporte de gases consiste en acoplar el tren de gases de los HR's a la PTG de los HLE's, el cual se presenta frente a una falla en el sistema de limpieza de gases de los HR's que implique una detención prolongada de ésta.

En dicho caso, los pasos a seguir son:

1. Detención tren de gases HR's (por falla en su PTG).

2. Decidir operacionalmente si se puede completar el o los ciclos de los HLE's que estén en proceso, previo a pasarlos a "Operación de emergencia". Una vez que los HLE's están en condición de emergencia, el tren de gases es enfriado mediante la succión realizada por el VTI de la PTG-HLE's. Cuando la temperatura es la adecuada, se procede a realizar la interconexión de los trenes de gases.
3. La interconexión de los trenes de gases se realiza mediante el cambio de flanges ciegos que comunican los trenes de gases de ambas plantas y reinstalación de dichos flanges ciegos en los ductos de operación normal, de tal forma que bloquee el paso de éstos (ver Ilustración G.1).
4. Una vez conectados, se podrá continuar con la operación de los HR's.
5. Por otra parte, los HLE's operacionalmente estarán detenidos por soporte térmico, pudiendo ser utilizados como hornos retenedores de carga.

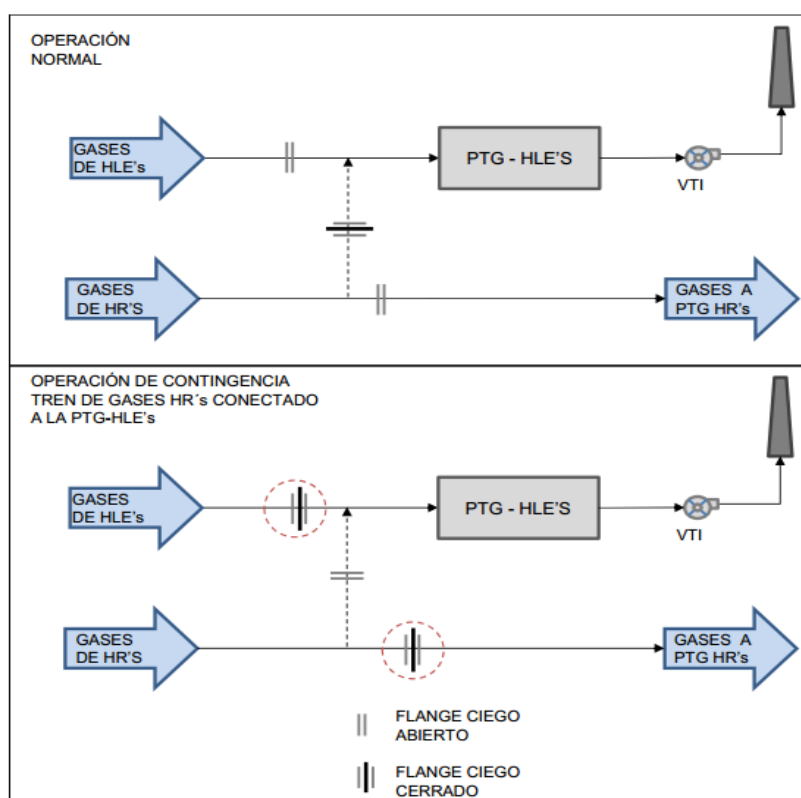


Ilustración G.1: de acoplamiento del tren de gases HR's a PTG HLE's

Cabe señalar que una vez solucionado el problema que dejó fuera de operación a la PTG-HR's, se deberá volver a normalizar y conectar sus respectivos trenes de gases.

Un punto importante de mencionar es que la PTG-HLE's es respaldo de la PTG-HR's, pero no en caso contrario. Esto se debe a que el nivel de contaminantes en los gases de los HLE's es mucho mayor que los presentes en los HR's, destacando el caso del As.

La PTG-HLE's se diferencia de la de los HR's debido a que presenta otra etapa con un segundo precipitador electrostático que garantiza el cumplimiento de la norma respecto del As en gases finales ($<1 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$).

En caso de que la salida de operación de los HLE's durante el periodo que no pueda ser utilizado su PTG, la escoria del Horno Flash debe ser sangrada por la canaleta de emergencia hacia una olla de escoria, para ser llevada a enfriamiento y posterior reproceso.

Frente a la falla de una de las bombas de recirculación del circuito de agua de enfriamiento/lavado de gases, entrará en operación una de las bombas que se encuentra en stand-by.

En el caso que sea necesario ser evacuada la torre quench, ya sea por exceso de nivel o limpieza de la misma, el sangrado será colectado dentro del pretil, pudiendo recircularse al sistema por medio de una bomba de piso manual hacia la primera etapa de Separación Sólido/Líquido cuando se trata de agua de procesos bajos en sólidos, o al estanque del filtro prensa si el contenido de sólidos es alto.

Contingencia en Subsistema de Suministro de Agua de Proceso y Agua de Emergencia

En caso de que llegase a fallar la bomba de agua de procesos, correspondiente a la PTG-HR's y PTG-HLE's respectivamente, será activada la bomba que se encuentra en stand by.

Frente a interrupciones en el suministro de agua de proceso y bajo nivel de agua en la torre quench, será activada el agua de emergencia, dejando los HLE's en operación con condición de emergencia. En este caso, se dispone de 10 minutos aproximadamente para que los gases presentes en el tren de gases sean enfriados, lavados y evacuados por la chimenea.

Cabe señalar que el Sistema de Agua de Emergencia puede operar con una o ambas PTG's a la vez.

Contingencia en Subsistema de Separación Sólido/Líquido y Manejo de Subproductos Recirculados

Durante su operación, las plantas de tratamiento de gases, trabajan con agua de lavado de gases con contenido de sólidos del orden 2 y 5 [g/L], a pesar de ello, pueden trabajar hasta un orden de 10 [g/L] ante contingencias que obliguen a detener la alimentación de agua de lavado de gases hacia el subsistema de separación sólido/líquido. Este margen de operación otorga a la PTG un tiempo de autonomía de 6 [h] con el subsistema de separación sólido/líquido fuera de operación, pudiendo monitorear la calidad del agua por medio del turbidímetro instalado en la línea de salida de las bombas de agua de recirculación.

En caso de requerir un tiempo mayor a 6 [h], se podrá sangrar parte del agua de lavado de gases al pretil de la torre quench. No obstante, si el periodo es más prolongado, la planta de tratamiento de gases respectiva deberá ser detenida.