

**PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN UN ESTUDIO DE CONFIABILIDAD Y  
RIESGO PARA LAS VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DEL CAMPO  
FLOREÑA – EQUIÓN ENERGÍA LIMITED**

**NELLY MARCELA TORRES CRISTANCHO  
JHONNATAN PÉREZ CAMELO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2016**

**PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN UN ESTUDIO DE CONFIABILIDAD Y  
RIESGO PARA LAS VALVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DEL CAMPO  
FLOREÑA – EQUIÓN ENERGÍA LIMITED**

**NELLY MARCELA TORRES CRISTANCHO  
JHONNATAN PÉREZ CAMELO**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de  
Especialista en Gerencia de mantenimiento**

**Director:  
NELSON EMILIO MEJÍA SILVA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2016**

## DEDICATORIA

***Agradezco a Dios, por acompañarme, guiarme, protegerme, por regalarme salud para poder culminar este nuevo logro.***

***A mi hijo JHOSEP MATTEO SOLANO TORRES por ser mi inspiración y motivo de mi persistencia en alcanzar nuevos logros, por ser el motor de mi vida y prestarme el tiempo que le pertenecía para culminar este logro.***

***A mi compañero de vida JORGE SOLANO por apoyarme para cumplir este nuevo logro, por su amor y comprensión en todo momento.***

***A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, por su incondicional apoyo.***

***Marcela Torres.***

***A Dios, por permitirme alcanzar este logro y llenarme de bendiciones e iluminar mi camino.***

***A mi esposa María del Pilar y a mi hija Luisa Fernanda por su apoyo incondicional y por cederme este espacio dentro de nuestro sagrado tiempo de descanso para continuar con mi desarrollo profesional.***

***A mi madre María Esperanza por los valores que me inculcó y me han permitido ser el profesional exitoso que soy.***

***Jhonnatan P.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de esta monografía queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto, sin su ayuda, nada de esto hubiera sido posible.

Agradecemos a Nelson Mejía y Antonio Patío, ingenieros senior de integridad de EQUIÓN Energía Ltd., por su guía técnica y colaboración durante el proyecto.

A la gerencia de operaciones de EQUIÓN Energía Ltd. por facilitarnos toda la información requerida y poner su confianza en los resultados plasmados en este documento para su futura implementación.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	19
1. GENERALIDADES SOBRE EQUIÓN.....	21
1.1 HISTORIA Y LOCALIZACIÓN .....	21
1.2 ESTRUCTURA DEL MANTENIMIENTO.....	22
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA SOBRE LOS ACTIVOS EN EQUIÓN...23	23
1.4 OBJETIVOS.....	24
1.4.1 General:.....	24
1.4.2 Específicos:.....	24
2. MARCO TEÓRICO .....	25
2.1 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO (ENFOQUE A LA CLASE MUNDIAL)....25	25
2.1.1 Función y objetivo de mantenimiento.....	25
2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO .....	26
2.2.1 Mantenimiento Correctivo .....	26
2.2.2 Mantenimiento Preventivo. ....	26
2.2.3 Mantenimiento Predictivo .....	26
2.2.4 Mantenimiento Cero Horas (Overhaul) .....	27
2.3 PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO.....	27
2.3.1 Disponibilidad.....	27
2.3.2 Confiabilidad .....	28

2.3.3 Curva de Confiabilidad.....	28
2.4 CURVA DE DAVIES O DE LA BAÑERA .....	30
2.5 MANTENIBILIDAD .....	32
2.6 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO .....	32
2.6.1 Distribución de Weibull.....	32
2.6.2 Interpretación parámetro de forma $\beta$ .....	33
2.7 RIESGO .....	35
2.7.1 Gestión del riesgo .....	36
2.7.2 Inspección basada en riesgo. ....	36
2.7.3 Valoración del riesgo .....	38
2.7.3.1 Determinación de la probabilidad de falla (PoF) .....	38
2.7.3.2 Determinación de la consecuencia de falla (CoF).....	38
2.7.3.3 Determinación del riesgo .....	42
2.7.4 Manejo del riesgo .....	43
2.7.5 Estrategia de inspección basada en riesgo.....	44
2.8 DISPOSITIVOS DE ALIVIO DE PRESIÓN .....	45
2.8.1 Válvulas de alivio de presión.....	46
2.8.2 Válvulas de seguridad.....	47
2.8.3 Válvula de alivio.....	47
2.8.4 Válvula de alivio de seguridad. ....	48
2.8.5 Válvula de alivio de seguridad convencional.....	48
2.8.6 Válvula de alivio de seguridad balanceada.....	48
2.8.7 Válvula de alivio de seguridad operada por piloto.....	49

2.8.8 Válvula de alivio de presión y/o vacío .....	50
2.8.9 Discos de ruptura.....	51
3. RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	53
3.1 PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL .....	55
3.2 HISTORIAL DE FALLA .....	57
4. DESARROLLO DEL MODELO DE MANTENIMIENTO .....	58
4.1 MODELO DE CONFIABILIDAD .....	58
4.1.1 Cálculos Weibull .....	58
4.1.2 Cálculo de los parámetros de Weibull por método de los mínimos cuadrados .....	58
4.1.3 Rango de la mediana.....	58
4.1.4 Cálculo de los parámetros $\beta$ (BETA) y $\eta$ (ETA).....	60
4.2 MODELO DE RIESGO.....	67
4.2.1 Metodología del RBI .....	67
4.2.2 Identificación de modos de falla.....	67
4.2.3 Probabilidad de falla PoF .....	68
4.2.4 Consecuencia de falla CoF.....	74
4.2.5 Valoración del riesgo .....	76
4.2.6 Asunciones / Comentarios al modelo de riesgo s. ....	78
5. ESTRATEGIA PROPUESTA – PLAN DE MANTENIMIENTO .....	82
5.1 PREPARACIÓN DE LOS PLANES DE INSPECCIÓN .....	82
5.1.1 Parámetro de vida media.....	88
6. CONCLUSIONES .....	90

BIBLIOGRAFÍA.....93  
ANEXOS.....96

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Tipos de dispositivos de alivio de presión .....	46
Tabla 2 Listado de dispositivos de alivio de presión y características .....	55
Tabla 3 Severidad del servicio .....	70
Tabla 4 Factores de ajuste del parámetro característico $\eta$ .....	71
Tabla 5 Frecuencia de los eventos iniciadores .....	71
Tabla 6 Efectividad de la inspección .....	73
Tabla 7 Factores del nivel de confianza en la inspección .....	73
Tabla 8 Categorías de probabilidad para equipo estático .....	74
Tabla 9 Resultado general del cálculo de la POF .....	74
Tabla 10 Categorías de COF utilizadas en el estudio .....	75
Tabla 11 Resultado general de la asignación de CoF .....	75
Tabla 12 Clasificación general basada en el riesgo calculado por API 581 .....	77
Tabla 13 Asunciones y comentarios .....	78
Tabla 14 Criterios para la definición de los planes de inspección .....	83

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Vista aérea del CPF Floreña.....	21
Figura 2. Organigrama de mantenimiento .....	23
Figura 3. Evolución de los tipos de mantenimiento.....	28
Figura 4. Curva de Davies o de la bañera. ....	31
Figura 5. Gestión del riesgo usando RBI .....	37
Figura 6. Matriz de riesgo .....	43
Figura 7. Válvulas de alivio de seguridad balanceadas por fuelle.....	45
Figura 8. Válvula de alivio de seguridad en funcionamiento .....	46
Figura 9. Válvula de seguridad .....	47
Figura 10. Válvulas de alivio de seguridad .....	49
Figura 11. Válvulas operada por piloto .....	50
Figura 12. Válvula de venteo de conservación (combinación de contrapesas y resorte y protección por presión y vacío) .....	51
Figura 13. Disco de ruptura .....	52
Figura 14. Información técnica de cada dispositivo de alivio de presión.....	54
Figura 15. Información Tipo de intervención realizada .....	54
Figura 16. Tiempos entre falla y falla (TBF).....	54
Figura 17. Frecuencia actual de overhaul.....	56
Figura 18. Frecuencia actual de prueba de desempeño en banco .....	56
Figura 19. Frecuencia actual de prueba de desempeño en línea .....	57
Figura 20. Cálculo de $\lambda$ , $F(t)$ y TBF para PSV-0131 .....	59
Figura 21 Comprobación de bondad.....	63
Figura 22. Comparación entre la curva de la bañera y tasa de fallas de Weibull de la PSV – 0131.....	65
Figura 23. Curvas de Confiabilidad y Desconfiabilidad de Weibull PSV- 0131 .....	65

Figura 24. Curva de tasa de fallas de Weibull PSV- 0131 .....	66
Figura 25. Matriz de riesgo - valoración de criticidad de los PRD's .....	76
Figura 26 Diagrama de Pareto para el riesgo global de los PRD's .....	77
Figura 27 Intervalo de servicio (desensamble e inspección interna).....	87
Figura 28 Intervalo de pruebas de desempeño .....	87
Figura 29 Intervalo de inspección visual en servicio .....	88
Figura 30 Tiempo promedio de vida .....	89

## LISTA ANEXOS\*

ANEXO A. Modelo de riesgo y confiabilidad para los dispositivos de alivio de presión del CPF de Floreña.

ANEXO B. Intervalos de inspección

ANEXO C. Tiempo medio de vida característico para cada fabricante y modelo de válvulas.

ANEXO D. Modelo de confiabilidad

---

\* Los anexos correspondientes a este proyecto, pueden ser consultados en la biblioteca UIS: Sala base de datos

## RESUMEN

**TITULO:** PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN UN ESTUDIO DE CONFIABILIDAD Y RIESGO PARA LAS VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DEL CAMPO FLOREÑA – EQUIÓN ENERGÍA LIMITED

**AUTORES:** NELLY MARCELA TORRES CRISTANCHO  
JHONNATAN PÉREZ CAMELO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Válvulas, Alivio, Presión, Mantenimiento, Planeación, Riesgo, Confiabilidad

### DESCRIPCIÓN:

Esta monografía muestra el desarrollo de una estrategia de mantenimiento basado en confiabilidad y riesgo para las válvulas de alivio de presión de Equión Energía en el CPF de Floreña. Su principal propósito es optimizar las actividades de intervención mediante la planeación basada en riesgo de las inspecciones y pruebas.

Se desarrollaron dos modelos de análisis utilizando la distribución de Weibull, uno para evaluar la confiabilidad por medio de la determinación del tiempo medio entre fallas, y otro para evaluar el riesgo por medio de la estimación de probabilidades de falla en función del tiempo.

Para el desarrollo de los modelos de cálculo, se requirió en primera instancia conocer el universo de dispositivos instalados en la planta. Para ello se creó una base de datos en la cual se generó un inventario, tomando como referencia la información de los diagramas de tubería e instrumentación – (P&IDs por sus siglas en inglés).

Posteriormente se ubicaron los registros históricos de inspección y pruebas, los cuales fueron organizados cronológicamente para cada dispositivo.

El resultado es una estrategia de mantenimiento centrada en la gestión del riesgo que está encaminada al cumplimiento de las metas presupuestales y de producción de la organización, logrando posicionar a Equión como una compañía altamente competitiva en el sector Oil & Gas de Colombia.

---

\* Monografía de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.  
Director: Nelson Emilio Meja Silva

## ABSTRACT

**TITLE:** MAINTENANCE STRATEGY BASED ON RELIABILITY AND RISK STUDY FOR PRESSURE SAFETY VALVES IN EQUION'S CENTRAL PRODUCTION FACILITY - FLOREÑA<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** NELLY MARCELA TORRES CRISTANCHO  
JHONNATAN PÉREZ CAMELO<sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** Maintenance, strategy, pressure, safety, valve, reliability, risk,

### CONTENTS:

This paper shows the development of a maintenance strategy based on a reliability and risk assessment for Pressure relieve devices (PRD's) in Floreña process facility operated by Equion Energia Ltd.

The purpose of the strategy is to optimize the maintenance activities and to guarantee the reliability of the PRD's to avoid a major accident caused by overpressure.

Two models were developed using Weibull cumulative failure density function. The first was used to compute the reliability indicator based on mean time between failure and the second was used to express the probability of failure to open and the probability of leakage as a function of time for risk-based planning of inspections and test. The main objective of the models was to complement each other using the characteristic parameter of life ( $\eta$ ) and MTBF.

For the development of the calculation models, it was required in the first instance to know the universe of devices installed in the plant. For this purpose, a database was created in which an inventory was generated, taking as reference the information of the pipe and instrumentation diagrams.

Subsequently the historical records of inspection and tests were located, which were organized chronologically for each device.

The result was a maintenance strategy focused on the risk management that will allow to achieve the organization goals in terms of cost reduction and high production and will consolidate Equion as a highly competitive organization among companies in Colombia.

---

<sup>\*</sup> Monography

<sup>\*\*</sup> Faculty of Engineering Physical Mechanical School of Engineering Mechanical. Especialization of Gerence of Maintenance. Director: Nelson Emilio Meja Silva

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los sistemas mecánicos de seguridad que salvaguardan los activos en una planta de procesamiento de hidrocarburos se encuentran los dispositivos de alivio de presión (Pressure Relieve Devices - PRD's). Estos se consideran la última capa de protección para los sistemas presurizados que en la actualidad operan con valores hasta 6150 psi<sup>1</sup>; su función es relevar el exceso de presión de manera segura hacia un sistema de combustión controlada (tea) o en algunos casos a la atmósfera, protegiendo al personal, medio ambiente y equipos, y evitando causar daños o pérdida de contención (fugas) que resultan en costosas paradas de planta no planeadas.

Garantizar su disponibilidad y mantener el riesgo en los niveles más bajos tolerables para la organización es esencial para mantener la continuidad del negocio de forma segura, responsable y sostenible.

En la actualidad, el mantenimiento de los dispositivos de alivio de presión se realiza bajo un esquema de programación estático con frecuencias preestablecidas que si bien se cumplen a cabalidad, no tienen en cuenta el resultado del desempeño de un PRD entre intervenciones y no generan valor para la estrategia de mantenimiento ni para la confiabilidad de la planta.

Bajo este panorama, surge la necesidad de implementar un estudio de riesgo que permita generar de manera segura una nueva estrategia de mantenimiento acorde a las condiciones del mercado de los hidrocarburos y la constante necesidad de optimizar los procesos para generar un verdadero valor para la organización.

---

<sup>1</sup> Información suministrada por el departamento de operaciones de Equión.

La inspección basada en riesgo y los análisis de confiabilidad facilitan ese marco estratégico para el desarrollo de los planes de una manera sistemática y organizada que trae beneficios inmediatos aplicables a su implementación, esto es, reducción de actividades de intervención, menos pérdidas de producción asociadas a paradas para mantenimiento, menor stock de repuestos y en general un incremento en la disponibilidad y confiabilidad de los activos (pocas fallas) y menores tiempos de intervención.

Esta monografía muestra el desarrollo de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad e integrado a un modelo de riesgo que permite la actualización de los planes de intervención de manera dinámica conforme se ejecutan las actividades, facilita la toma de decisiones relacionadas con la gestión del riesgo y permite identificar y corregir eficientemente las desviaciones detectadas en el proceso.

Este estudio finalmente servirá como punto de partida para la implementación de la estrategia global de mantenimiento de clase mundial que la superintendencia de mantenimiento e integridad de activos de Equión tiene como objetivo implementar en los próximos años.

## 1. GENERALIDADES SOBRE EQUIÓN

### 1.1 HISTORIA Y LOCALIZACIÓN

Equión Energía Limited es la nueva marca de la sucursal establecida en Colombia por BP Exploration Company en 1986, cuyos accionistas son Ecopetrol (51%) y Repsol (49%). Es una compañía nacional que desarrolla actividades de exploración y producción de hidrocarburos, y suma más de 28 años de operaciones en Colombia.<sup>2</sup>

El campo Floreña está ubicado en el corregimiento el Morro del municipio de Yopal y opera bajo uno de los contratos de asociación con Ecopetrol.

**Figura 1. Vista aérea del CPF Floreña**



---

<sup>2</sup> EQUION-ENERGIA Historia de Equión Yopal, Colombia, [en línea] [citado ene. 2016]. Disponible en <[http://www.equion-energia.com/quienes\\_somos/Paginas/default.aspx](http://www.equion-energia.com/quienes_somos/Paginas/default.aspx) />

Actualmente produce 56000 barriles de crudo que se almacenan y posteriormente envían por una tubería hacia la estación Araguaney, propiedad de Ecopetrol y 240 millones de pies cúbicos de gas por día (MMSCFD) del cual se utiliza una parte para reinyectarlo a las formaciones y mantener las tasas de recobro y la otra para suministro a la termoeléctrica de Yopal – TERMOYOPAL, Perenco y el corregimiento del Morro.

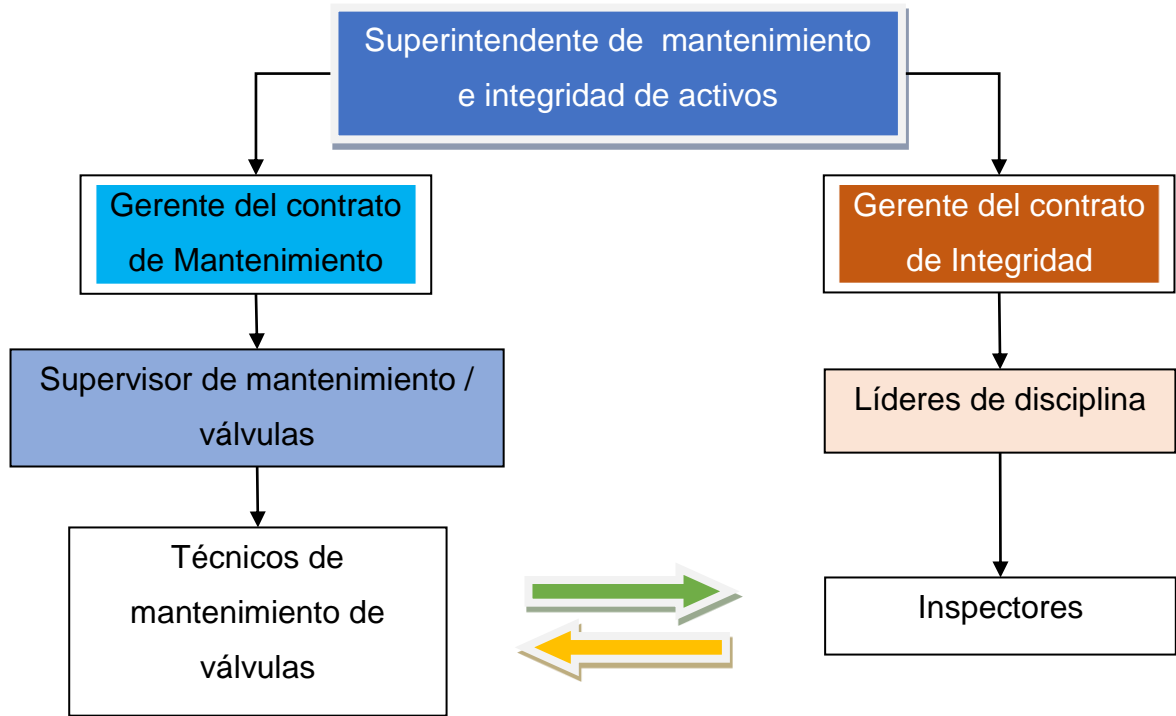
## **1.2 ESTRUCTURA DEL MANTENIMIENTO**

El responsable por la gestión del mantenimiento en la organización es el Superintendente de mantenimiento e integridad de activos quien a su vez designa la responsabilidad de la ejecución de las estrategias y planes tácticos y operativos a las compañías especializadas en cada disciplina (mantenimiento e integridad).

Las actividades de mantenimiento e inspección están lideradas por los gerentes de las compañías contratistas y a su vez por sus delegados en campo. Finalmente los ejecutantes poseen relación sin subordinación para el desarrollo de las tareas de mantenimiento e inspección.

En la figura 2 se relaciona de manera general el organigrama de la estructura de gestión de mantenimiento.

**Figura 2. Organigrama de mantenimiento**



### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA SOBRE LOS ACTIVOS EN EQUIÓN**

Dentro de los sistemas de seguridad que salvaguardan los activos y el proceso en este campo se encuentran los dispositivos de alivio de presión (PRD's). Estos se consideran la última capa de protección para los sistemas presurizados que en la actualidad operan con valores hasta 5100 psi; su función es relevar el exceso de presión de manera segura hacia un sistema de combustión controlada (tea) o en algunos casos a la atmósfera, protegiendo al personal, medio ambiente y equipos de la planta y evitando causar daños o pérdida de contención de los sistemas, que resultan en costosas paradas de planta no planeadas.

Garantizar su disponibilidad y mantener el riesgo en los niveles más bajos tolerables para la organización es esencial para mantener la continuidad del negocio de forma segura, responsable y sostenible.

## **1.4 OBJETIVOS**

**1.4.1 General:** Desarrollar un plan de mantenimiento para los dispositivos de alivio de presión del campo Floreña relacionando los indicadores de confiabilidad con el nivel de riesgo calculado según API 581 para optimizar la gestión de mantenimiento y el cumplimiento de las metas presupuestales y de producción de la organización.

### **1.4.2 Específicos:**

- Identificar los dispositivos de alivio de presión a los cuales se les va aplicar la metodología.
- Crear en Microsoft Excel un modelo de riesgo aplicando la metodología de API 580/581.
- Crear una hoja de cálculo de indicadores de confiabilidad e integrarla al modelo de riesgo para actualizarlo de forma dinámica con los resultados de las inspecciones.
- Definir para cada fabricante y modelo de válvula, el tiempo medio entre fallas (MTBF) o parámetro de vida característico que será aplicado en el modelo de riesgo por medio de la distribución de Weibull.
- Redefinir las frecuencias de mantenimiento actuales y establecer los planes de inspección con base en los resultados del modelo de gestión de mantenimiento propuesto.

- Determinar las ventajas de la estrategia de mantenimiento propuesta vs actual en términos de costo-beneficio para implementarla en las demás facilidades operadas por Equión Energía Limited.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO (ENFOQUE A LA CLASE MUNDIAL)

Según Xenos<sup>3</sup>:

Las actividades de mantenimiento existen para evitar la degradación natural de cualquier activo. Esos desgastes se manifiestan de diversas formas, desde una mera apariencia, pérdida parcial o total de las funciones requeridas ocasionando paradas de producción y fabricación, pérdidas de calidad de los productos o servicios, contaminación y desastres ambientales. Como esta área tiene una fuerte relación con los sectores productivos principalmente a la calidad y a la productividad, ella acaba desempeñando un papel estratégico y fundamental en la mejoría de los resultados operacionales y financieros del negocio.

**2.1.1 Función y objetivo de mantenimiento.** El objetivo de mantenimiento es conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producción en condiciones de calidad exigible, al mínimo costo, con el máximo nivel de seguridad para el personal que lo utiliza y lo mantiene y con una mínima degradación del medio ambiente. Al conseguir todos estos puntos se está ante una buena gestión integral de mantenimiento.

---

3 XENOS, H.G. Gestión de Mantenimiento Productivo. Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

La función principal de mantenimiento es maximizar la disponibilidad que se requiere para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones. Para minimizar el deterioro de los equipos, lo cual se debe lograr con el menor costo posible y a largo plazo.

## **2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO**

**2.2.1 Mantenimiento Correctivo.** Consiste en corregir averías o fallas, cuando éstas se presentan provocando el paro súbito de la máquina, se caracteriza por no tener una planeación y programación de las actividades de mantenimiento, no hay diagnóstico previo del estado en que se encuentra la máquina y generalmente la reparación es urgente.

**2.2.2 Mantenimiento Preventivo.** Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno. Suele tener un carácter sistemático, es decir, se interviene aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema. Lo que se pretende con este tipo de mantenimiento es reducir el número de intervenciones correctivas, realizando tareas de inspecciones periódicas y sustitución de componentes gastados. Es un tipo de mantenimiento exigente, pues requiere de una disciplina estricta de supervisión y elaboración de un plan de mantenimiento preventivo a cumplir por personal especializado. Además, al estar formado por tareas rutinarias, puede provocar falta de motivación en el personal encargado y, si no se realiza correctamente, llegar a suponer un sobre costo sin mejoras notables en productividad. Por el contrario, el realizarlo correctamente supone el conocer perfectamente la máquina con la que se trabaja, lo que permite realizar estudios de fiabilidad óptimos y reducir las intervenciones correctivas.

**2.2.3 Mantenimiento Predictivo** Al igual que el preventivo, este mantenimiento consiste en anteponerse a la avería o falla, la diferencia es que se basa en la

aplicación de herramientas ó técnicas de detección de los diferentes elementos medibles de anticipación al fallo, como por ejemplo el desgaste. Su objetivo es realizar el mantenimiento justo en el momento preciso. Para poder realizarlo es necesario disponer de tecnología basada en indicadores que sean capaces de medir las variables que marquen la intervención a la máquina, así como personal preparado en la interpretación de los datos.

**2.2.4 Mantenimiento Cero Horas (Overhaul)** Es el conjunto de tareas cuyo objetivo es revisar los equipos a intervalos programados antes de presentarse algún fallo, bien cuando la confiabilidad del equipo ha disminuido apreciablemente de manera que resulta arriesgado hacer previsiones sobre su capacidad productiva. Dicha revisión consiste en dejar el equipo a Cero horas de funcionamiento, es decir, como si el equipo fuera nuevo. En estas revisiones se sustituyen o se reparan todos los elementos sometidos a desgaste. Se pretende asegurar, con gran probabilidad un tiempo de buen funcionamiento.

## **2.3 PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO**

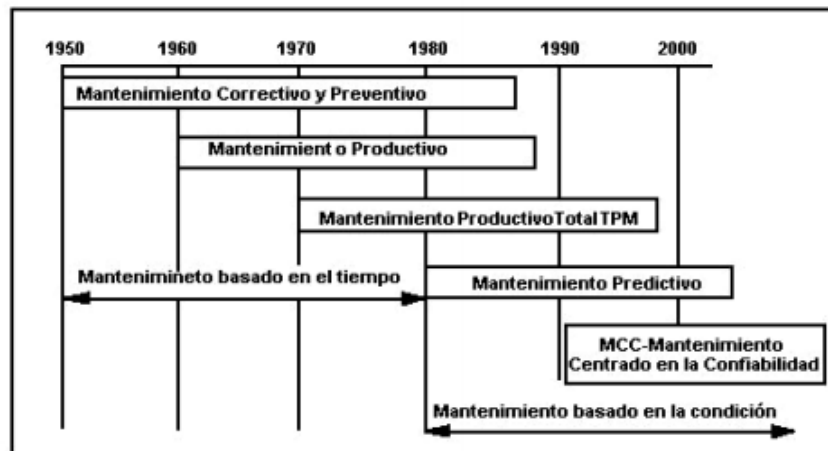
**2.3.1 Disponibilidad** Es la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables. Existen varios métodos para lograr que un equipo esté disponible uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sean confiables y, por lo tanto, demasiado costosos.

EL objetivo principal del mantenimiento, puede ser definida como la confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el sistema está listo para operar o

producir, esto en sistemas que operan continuamente. En la fase de diseño de equipos o sistemas, se debe buscar el equilibrio entre la disponibilidad y el costo. Dependiendo de la naturaleza de requisitos del sistema, el diseñador puede alterar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, de forma a disminuir el costo total del ciclo de vida<sup>4</sup>.

**2.3.2 Confiabilidad** La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales fue diseñado, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno, a medida que aumenta la frecuencia de fallas la confiabilidad del equipo disminuye.

**Figura 3. Evolución de los tipos de mantenimiento**



Fuente: REDALYC [en línea] [citado en Septiembre 2016] disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920491036>,

**2.3.3 Curva de Confiabilidad** La forma gráfica como se expresa la confiabilidad depende de su formulación matemática. La probabilidad de ocurrencia de un evento se define mediante la expresión:

<sup>4</sup> MORA, Alberto. Mantenimiento, planeación, ejecución y control. 1 ed. México, Septiembre, 2009. P. 89

$$P_{f=\left(\frac{n}{N}\right)}$$

Donde:

$n$  son eventos de falla (en confiabilidad) por estudiar;  $N$  es el número total de eventos posibles;  $P_F$  es la probabilidad de falla.

$$P_f = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N}\right)^n$$

$$R_a = 1 - P_f$$

*Ecuación 1*

Donde:

$P_F$  Se define como la probabilidad de que ocurra el evento  $n$  ante una serie grande o infinita  $N$ , de eventos posibles. Con  $R_a$  como la probabilidad de confiabilidad o de éxito o de supervivencia, en un tiempo  $a$  siendo  $P_F$  la probabilidad de falla en ese mismo tiempo  $a$ .

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo  $t$  en un período  $T$  total. Se puede entender de dos maneras: la primera consiste en la representación de la probabilidad de confiabilidad o supervivencia que tiene un elemento, máquina o sistema después de que transcurre un determinado tiempo  $t$ ; la otra forma de interpretarla es cuando se analizan varios o múltiples elementos (no reparables, normalmente)

similares que tienen la misma distribución de vida útil; en este caso expresa el porcentaje de ellos que aún funcionan después de un tiempo  $t$ <sup>5</sup>.

Representación matemática de la función de confiabilidad.

$$R(t) = P[t < T]$$

Donde:

$R(t)$  Es la función de confiabilidad o supervivencia, la cual decrece en la medida en que se incrementa el tiempo, al igual  $R(0) = 1$  o sea que siempre la probabilidad de confiabilidad de cualquier elemento antes de iniciar su funcionamiento es máxima del ciento por ciento (100%);  $t$  es el tiempo determinado para evaluar el funcionamiento.  $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$  expresa que todo elemento o máquina, siempre entra en estado de falla así sea en un tiempo grande o infinito.

## 2.4 CURVA DE DAVIES O DE LA BAÑERA

La curva de bañera (fig. 5), es una grafica que representa los fallos durante el periodo de vida útil de un sistema o máquina. Se llama así porque tiene forma de bañera cortada a lo largo.

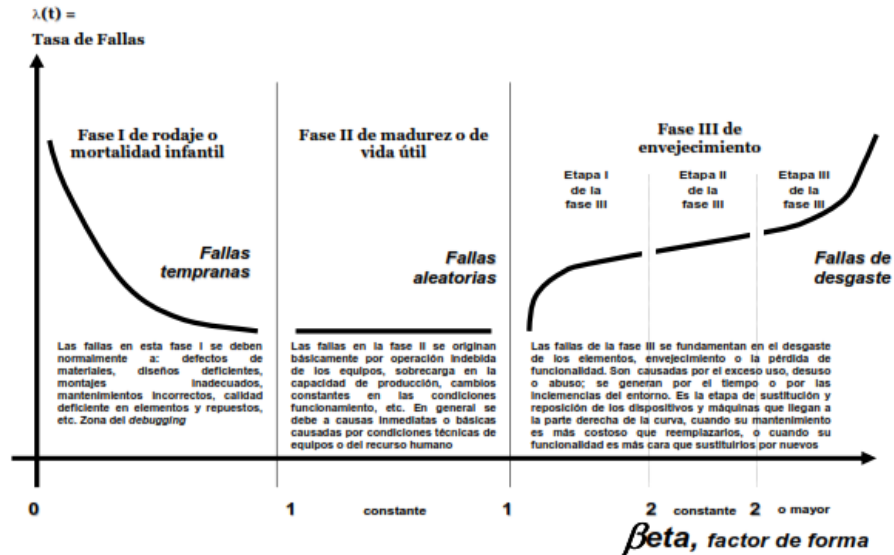
Las diferentes acciones que se deciden sobre las tareas que se deben realizar por parte de mantenimiento (y producción), dependen entre otros parámetros de la curva de la bañera o de Davies, donde se muestra la evolución en el tiempo frente

---

<sup>5</sup> BOX Mantenimiento, planeación, ejecución y control[en línea] [Citado en septiembre de 2016]. Disponible en <<https://app.box.com/s/srmlryr6a1lvtgpw1r93t9ju31wgrviu>>

a la tasa de fallas  $\lambda(t)$  y el valor del parámetro de forma Beta del equipo que se evalúa.

**Figura 4. Curva de Davies o de la bañera.**



Fuente: MORA, 2009,125

Fase I: Las fallas en esta fase I se debe normalmente a defectos de materiales, diseños deficientes, montajes inadecuados, mantenimientos incorrectos, calidad deficiente en elementos y repuestos.

Fase II: Las fallas en esta fase se originan básicamente por operación indebida de los equipos, sobrecarga en la capacidad de producción, cambios constantes en las condiciones de funcionamiento, en general se debe a causas inmediatas o básicas causadas por condiciones técnicas de equipos o del recurso humano.

Fase III: Las fallas de esta fase se fundamentan en el desgaste de los elementos, envejecimiento o la pérdida de funcionalidad. Son causados por el exceso de uso, desuso; se generan por el tiempo o por las inclemencias del entorno. Es la etapa de sustitución y reposición de los dispositivos y maquinas que llegan a la parte

derecha de la curva, cuando su mantenimiento es más costoso que reemplazarlos, o cuando su funcionalidad es más costosa que sustituirlos por nuevos.

## **2.5 MANTENIBILIDAD**

Se denomina mantenibilidad a la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, puedan regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal después de una avería, falla o interrupción productiva (funcional o de servicio), mediante una reparación que implica realizar unas tareas de mantenimiento, para eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción. La normalidad del sistema al restaurarse su funcionalidad se refiere a su cuerpo y a su función.

## **2.6 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO**

Las distribuciones de probabilidad son funciones matemáticas teóricas que se utilizan para realizar previsiones, que describen la forma en que se espera que varíen los resultados de un experimento. Por lo tanto son útiles en mantenimiento, debido a que, ayudan a tomar decisiones en condiciones de incertidumbre. Existen varios tipos de distribuciones como normal o de Gauss, lognormal, Rayleigh, exponencial, Gamma, Weibull, entre otras.

La distribución que explicaremos para la aplicación de este proyecto es:

**2.6.1 Distribución de Weibull** La distribución de Weibull es una distribución continua y triparamétrica, es decir, está completamente definida por tres parámetros y es la más empleada en el campo de la confiabilidad.

Una de las ventajas significativas que posee la distribución Weibull es que es de fácil manejo y se acomoda a las tres zonas de la curva de la bañera (infancia o

rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento). La distribución Weibull posee, en su forma tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad; estos son:

- Parámetro de posición ( $\gamma$ ): Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.
- Parámetro de escala o característica de vida ( $\eta$ ): es el parámetro para fijar la vida útil del producto o sistema.
- Parámetro de forma  $\beta$ : refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución, esta puede emplearse para cualquier tipo de componente y en cualquiera de sus etapas.

### 2.6.2 Interpretación parámetro de forma $\beta$

**$\beta < 1$  (Tasa de riesgo decreciente):** Implica mortalidad infantil si esto ocurre, puede existir:

- Carga, inspección o prueba inadecuada.
- Problemas de Manufactura.
- Problemas de reparación.

Si un componente sobrevive la mortalidad infantil, la resistencia a fallar mejora con la edad.

**$\beta = 1$  (Tasa de riesgo constante):** Implica fallas aleatorias (Distribución Exponencial). Una parte vieja es tan buena como una nueva si esto ocurre:

- Mezcla de modos de falla.

- Las fallas pueden deberse a eventos externos, como: luminosidad o errores humanos.
- Fundido y removido antes de su desgaste

**1 < β < 4 (Tasa de Riesgo creciente):** Si esto ocurre:

- La mayoría de los rodamientos y engranes fallan.
- Corrosión o Erosión.

**β > 4 (La tasa de riesgo crece rápidamente):**

- Implica edad avanzada y rápido desgaste.

Si esto ocurre, sospeche de: Propiedades del material, materiales frágiles como la cerámica, variabilidad pequeña en manufactura o material.

Para el desarrollo de este proyecto se aplicaran las ecuaciones que se utilizan en la distribución de Weibull mostradas a continuación:

Ecuación de densidad distribución Weibull:

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Ecuación de confiabilidad distribución Weibull

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Ecuación 3}$$

Ecuación de tasa de fallas distribución Weibull

$$h(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

*Ecuación 4*

Donde  $\beta$ : Parámetro de forma de distribución de Weibull.

$\eta$ : Parámetro de escala de la distribución de Weibull.

**F(t)**: función de densidad de fallas.

**R(t)**: función de confiabilidad

**h(t)**: función de tasa de fallas<sup>6</sup>.

## 2.7 RIESGO

Un riesgo es la posibilidad de que suceda o no un daño; la condición que causa heridas, muerte, pérdida de equipos y propiedades, o deterioro ambiental, es la causa de un daño.

Siempre existe un riesgo asociado a la operación de plantas que involucran procesos peligrosos. La valoración del riesgo es un proceso de gestión, capaz de maximizar la seguridad, confiabilidad y disponibilidad de una planta, así como minimizar los costos, haciendo una utilización racional de los recursos.

---

<sup>6</sup> AL-FAWZAN, Mohammad A. Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution. Saudi Arabia. Mayo, 2010. [online]. [citado en enero, 2016]. Disponible en <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.583.5465&rep=rep1&type=pdf>>

El riesgo se interpreta como la combinación entre la probabilidad (frecuencia de ocurrencia) y las consecuencias (o severidad) de un evento. Se limita su alcance a un ambiente específico y durante un período de tiempo determinado<sup>7</sup>. En términos matemáticos:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

*Ecuación 5*

La valoración efectiva del riesgo debe ser un proceso racional, lógico y estructurado que permita determinar qué tan significativo es el riesgo y si este es aceptable o no para la organización.

**2.7.1 Gestión del riesgo** El proceso de gestión del riesgo es una metodología que se basa en la identificación y control de los eventos que tienen el potencial de causar cambios no deseados en un equipo, sistema, proceso o planta. Para esto, se define el sistema a evaluar y se identifican sus peligros potenciales, posteriormente se definen los escenarios de peligro posibles y se evalúa la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias para cada uno de estos.

Las técnicas de identificación de peligros pueden incluir análisis de peligros del proceso (PHA), análisis de capas de protección (LOPA), valoración de peligros y operatividad (HAZOP), inspección basada en riesgo (RBI), análisis de modos y efectos de falla (FMEA), etc.

**2.7.2 Inspección basada en riesgo** La inspección basada en riesgo provee una técnica sistemática de evaluación de la probabilidad (confiabilidad) y la consecuencia (criticidad) de falla de un activo, y selecciona la frecuencia de inspección apropiada basada en el riesgo.

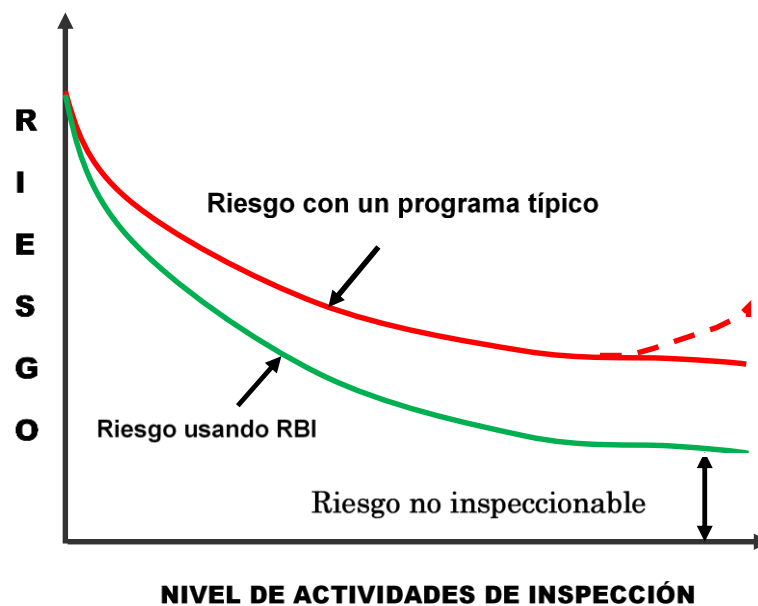
---

<sup>7</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection. API 580: 2016. 3ed. NW, Washington: API, 2016. 11p

La figura 6 muestra la reducción del riesgo que se puede esperar cuando se incrementan las actividades de inspección. La inversión inicial en actividades de inspección reduce considerablemente el riesgo, sin embargo hay un punto donde la relación entre las actividades de inspección y la reducción del riesgo es muy baja; incluso el aumento de las actividades de inspección puede incrementar el riesgo en algunos equipos, provocando deterioro por las mismas condiciones de intervención (ej. daño en el recubrimiento interno durante la despresurización, reacciones químicas del producto con el medio ambiente, etc).

La implementación de un programa de inspección basada en riesgo logra una mayor disminución del riesgo con el mismo nivel de actividades de inspección que un programa típico, ya que analiza la combinación adecuada de métodos y frecuencias de intervención, logrando la optimización del programa y sus costos.

**Figura 5. Gestión del riesgo usando RBI**



Fuente: API 580:2016 Optimización de la inspección. Página 13

**2.7.3 Valoración del riesgo** Para valorar el riesgo se debe conocer cuáles son los modos de falla posibles, cuáles son los mecanismos que los originan, y cuáles son las posibles consecuencias de las fallas.

**2.7.3.1 Determinación de la probabilidad de falla (PoF)** Se deben identificar los mecanismos de daño activo y creíble que razonablemente se esperaría que ocurrieran durante el periodo de tiempo considerado (en condiciones normales y anormales).

Determinar la susceptibilidad y ratas de deterioro utilizando un modelo matemático (distribución estadística, etc.) o información de pruebas de laboratorio, información de inspecciones previas, publicaciones de otras compañías o datos de monitoreo en sitio.

Determinar el/los modo(s) de falla y la probabilidad de que cada uno ocurra.

Evaluar la efectividad de los anteriores programas de inspección, mantenimiento y monitoreo y los futuros programas de inspección, mantenimiento y monitoreo. Usualmente se evalúa la PoF considerando varias estrategias alternativas de inspección y mantenimiento e incluso la estrategia que no contemple estas actividades.

Determinar la probabilidad de que con las condiciones actuales, la tasa de deterioro continúe y se produzca la falla.

**2.7.3.2 Determinación de la consecuencia de falla (CoF)** En este paso se utiliza un análisis de consecuencia, el cual debe ser repetible y sus estimaciones creíbles en torno a lo que puede pasar si ocurre la falla. Se lleva a cabo para estimar la consecuencia probable que ocurre debido a un modo de falla típico resultante de

un mecanismo de daño identificado. Las consecuencias se caracterizan típicamente en:

1. Impactos a la salud y seguridad
2. Impactos ambientales
3. Impactos económicos

Para llevar a cabo un análisis de consecuencia se pueden abordar metodologías cualitativas, semicuantitativas o cuantitativas. La diferencia entre estas radica en su grado de complejidad, ya que las cualitativas se basan en el conocimiento y experiencia de expertos para realizar las estimaciones, mientras que la cuantitativa utiliza modelos lógicos que recrean combinaciones de eventos para representar los efectos de la falla.

En un análisis cuantitativo, las consecuencias de liberación de materiales peligrosos se determinan en 5 pasos:

- Estimar la tasa de liberación o el inventario total disponible.
- Determinar si el fluido se dispersa de una forma rápida (instantánea) o lentamente (continua).
- Determinar si el fluido se dispersa en la atmósfera como un líquido o un gas.
- Estimar los impactos de cualquier sistema de mitigación.
- Estimar las consecuencias.

En torno a la consecuencia, los resultados de una fuga se refieren al comportamiento de los materiales peligrosos, ejemplos de esto es una dispersión segura, explosión o un jet fire.

Los eventos (fenómeno físico) de una fuga dependen de las propiedades y naturaleza del material liberado. Los eventos producto de una liberación pueden ser de 4 tipos: inflamable, tóxico, ambiental y de interrupción del negocio.

a) Eventos inflamables:

Como resultado de una fuga de producto inflamable se pueden producir seis tipos posibles de eventos:

- Dispersión segura: ocurre cuando un fluido inflamable es liberado y se dispersa sin hacer ignición. El fluido se dispersa en concentraciones inferiores a los límites de inflamabilidad antes de encontrar una fuente de ignición.
- Jet fire: resultado de la ignición de un chorro presurizado (high - momentum) de gas, líquido o bifásico. Los niveles de la radiación son generalmente altos cerca del jet. Si la fuga no presenta ignición inmediata una nube puede desarrollarse.
- Explosión: puede ocurrir bajo ciertas condiciones cuando el frente de llama viaja rápidamente. Las explosiones pueden causar daño por la onda de sobrepresión que es generado por el frente de llama.
- Flash fire: ocurre cuando se quema una nube del material bajo condiciones que no generan una sobre presión significativa. Las consecuencias de un flash fire solamente son relevantes dentro del perímetro y alrededor de la nube. Un flash fire no genera altos niveles de sobrepresión que produzcan daño a los equipos.

- Fireball: ocurre cuando se presenta ignición de una gran cantidad de combustible que ha experimentado una mezcla limitada con el aire del alrededor. Los efectos térmicos se extienden mas allá del contorno del fireball pero estos usualmente son de corta duración.
- Pool fire: se presentan por la ignición de piscinas de líquidos inflamables. Los efectos de radiación térmica son limitados a los alrededores de la misma piscina.

#### b) Eventos tóxicos

Cuando se libera un material tóxico pueden presentarse dos eventos: dispersión segura o manifestación de efectos tóxicos.

Para que ocurra un efecto tóxico, deben presentarse dos condiciones:

- La liberación deberá alcanzar a las personas en una suficiente concentración.
- Esta debe prolongarse por un determinado tiempo, tal que los efectos lleguen a ser dañinos.

Si las dos condiciones anteriores no se presentan, la liberación del material toxico resultará en una dispersión segura. Si están presentes ambas condiciones (concentración y duración) y las personas, ocurrirá una exposición tóxica.

#### c) Eventos ambientales

Desde el punto de vista ambiental, una dispersión segura ocurre:

- Si el material liberado es completamente contenido dentro de un límite físico de la facilidad (ej. dique o skid).
- Si el material no puede ser contenido, la liberación del material peligroso resultará en una piscina.
- La contaminación del agua subterránea se considerará como una fuga que se encuentra más allá de los límites de la planta

d) Interrupción al negocio

Las consecuencias a la producción ocurren comúnmente con cualquier pérdida de contención del fluido de proceso (fuga) y pueden ser adicionales o independientes a las consecuencias citadas previamente. Pueden incluir el valor del fluido de proceso perdido y el costo de la interrupción del negocio, el tiempo requerido para reiniciar las actividades, reparaciones, costos por pérdidas de producción en otras unidades o incluso la habilidad para reponer equipos dañados etc.

**2.7.3.3 Determinación del riesgo** Conociendo la PoF y CoF específica, se puede calcular el riesgo específico para cada situación. El riesgo total será la sumatoria de los riesgos individuales para cada consecuencia específica.

$$\text{Riesgo de una consecuencia específica} = \text{Probabilidad de una consecuencia específica} \times \text{Consecuencia específica}$$

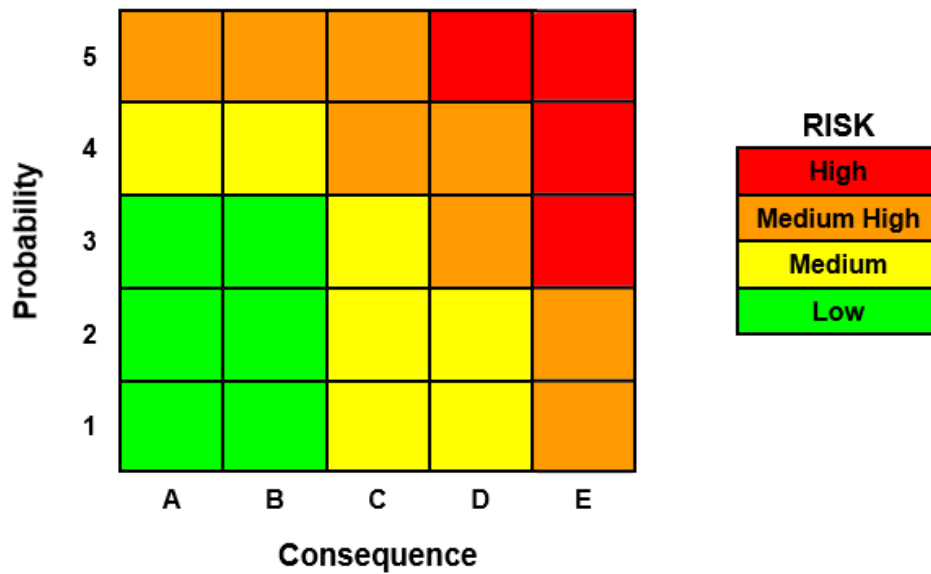
*Ecuación 6*

Uno de los objetivos de la valoración del riesgo es comunicar los resultados en un formato común que una variedad de personas puedan entender.

El uso de las matrices de riesgo para este caso es la mejor opción, ya que en esta se relacionan las categorías de probabilidad y consecuencia y la distribución del riesgo en un sistema analizado.

La siguiente figura muestra una matriz de riesgo típica donde los riesgos más altos se encuentran en la parte superior derecha (rojo) y los más bajos en la inferior izquierda (verde).

**Figura 6. Matriz de riesgo**



Fuente: API 581 - Risk-Based Inspection Technology

**2.7.4 Manejo del riesgo** Una vez determinado el riesgo, se clasifica (prioriza) y se define su aceptabilidad. Si un riesgo es aceptable para la organización, no se requiere ninguna acción ni mitigación; por el contrario, si un riesgo es inaceptable, se debe considerar su mitigación a través de alguna de las siguientes acciones:

- Decomisionamiento
- Inspección y reparación

- Mitigación de la consecuencia (cambios operacionales, aislamiento, sistemas de detección, etc.)
- Mitigación de la probabilidad (cambio de los materiales de construcción, cambios operacionales o rediseño, etc.)

A través de las actividades de inspección se puede manejar el riesgo, reduciendo la incertidumbre del estado de un componente. La inspección en si no reduce el riesgo, pero la información obtenida a través de ésta si mejora la manera de cuantificar el riesgo real. En la medida que se realiza la identificación, monitoreo y medición de los mecanismos de daño, se puede predecir con mayor certidumbre la fecha de falla de un componente e implementar las acciones de mitigación que eviten la falla

**2.7.5 Estrategia de inspección basada en riesgo** Los resultados del RBI se utilizan para desarrollar la estrategia de inspección en conjunto con las actividades y planes de mitigación, de manera que todos los equipos tengan riesgos aceptables para la organización. Estas se desarrollan teniendo en cuenta:

- Clasificación o ranking de riesgos
- Manejadores de riesgo
- Historial del equipo
- Número y resultado de las inspecciones
- Tipo y efectividad de las inspecciones
- Equipos en servicio similar y vida remanente

Las estrategias de inspección deben documentarse y los resultados de la misma deben retroalimentarse en un ciclo continuo centrado en los equipos con mayor riesgo. Esta visión permite manejar los costos de las actividades de inspección focalizando los esfuerzos en los elementos con mayor riesgo y reduciendo o eliminando actividades en áreas de bajo riesgo o donde la inspección tiene poco o ningún efecto en la reducción del mismo.

## 2.8 DISPOSITIVOS DE ALIVIO DE PRESIÓN

Los dispositivos mecánicos de alivio de presión son la última barrera de seguridad de un componente o un sistema presurizado. Su función es abrir de forma automática a una determinada presión y prevenir las consecuencias del incremento de la misma en un sistema de tubería, recipiente, equipo o tanque.

**Figura 7. Válvulas de alivio de seguridad balanceadas por fuelle**



Un dispositivo mecánico de alivio de presión, actúa a causa de la presión estática interna y está diseñado para abrir durante una situación de emergencia o condición anormal, previniendo el incremento de la presión interna del fluido en exceso de un valor de diseño específico. También pueden prevenir el incremento

de vacío en un sistema. En la figura 9 se ilustra el funcionamiento de una válvula de alivio de seguridad.

Dependiendo de su función y el tipo de servicio pueden ser válvulas de alivio de presión, dispositivos de apertura sin cierre y válvulas de alivio de presión y/o vacío. En la tabla 1 se detalla una breve descripción de estos tipos.

**Figura 8. Válvula de alivio de seguridad en funcionamiento**



Fuente: Lesser valves training course 2009 - The safety valves

**Tabla 1. Tipos de dispositivos de alivio de presión**

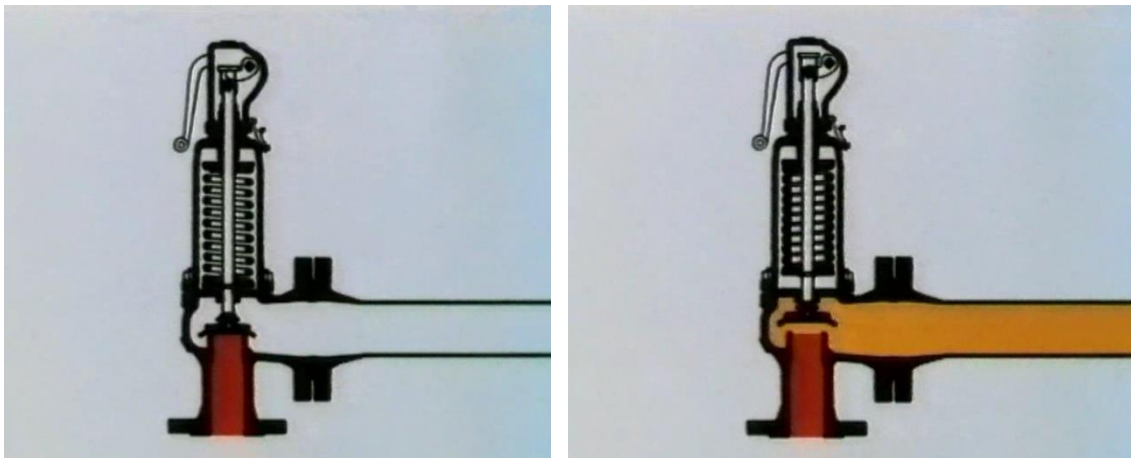
Tipo	Descripción
Dispositivo de apertura y cierre	Válvula de alivio de presión convencional
	Válvula de alivio de presión balanceada por fuelle
	Válvula de alivio de presión operada por piloto
	Válvula de alivio de presión con disco de ruptura
	Válvula de alivio de presión y vacío
	Válvula de alivio de seguridad
	Válvula de seguridad
Dispositivo de apertura sin cierre	Disco de ruptura
	Pin de ruptura

**2.8.1 Válvulas de alivio de presión** Este tipo de dispositivos están diseñados para abrir, liberar el exceso de presión y retornar a su posición de cierre una vez

las condiciones del sistema se han normalizado. Algunos ejemplos incluyen las válvulas de seguridad, válvulas de alivio y válvulas de alivio y seguridad convencionales, balanceadas y operadas por piloto.

**2.8.2 Válvulas de seguridad** Las válvulas de seguridad son una válvula de alivio de presión que funciona por medio de un resorte de carga directa que actúa sobre un disco que contrarresta la presión del fluido; cuando esta última vence la resistencia del resorte, la válvula abre rápida y completamente (lo que se conoce como “pop”). Estas válvulas se caracterizan por actuar a una mínima sobrepresión. Normalmente se utilizan en servicios con fluidos compresibles como vapor, gas y aire. La figura 10 muestra este principio.

**Figura 9. Válvula de seguridad**



Fuente: Lesser valves training course 2009- The safety valves

**2.8.3 Válvula de alivio** Funcionan también por medio de un resorte de carga directa que actúa sobre un disco que contrarresta la presión del fluido. La válvula de alivio comienza a abrir cuando la presión estática interna alcanza el valor de ajuste (o set de presión). La válvula actúa normalmente en proporción al incremento de presión y alcanza su apertura completa a una sobrepresión entre el 10 al 25%. Estas válvulas se utilizan comúnmente con fluidos incompresibles.

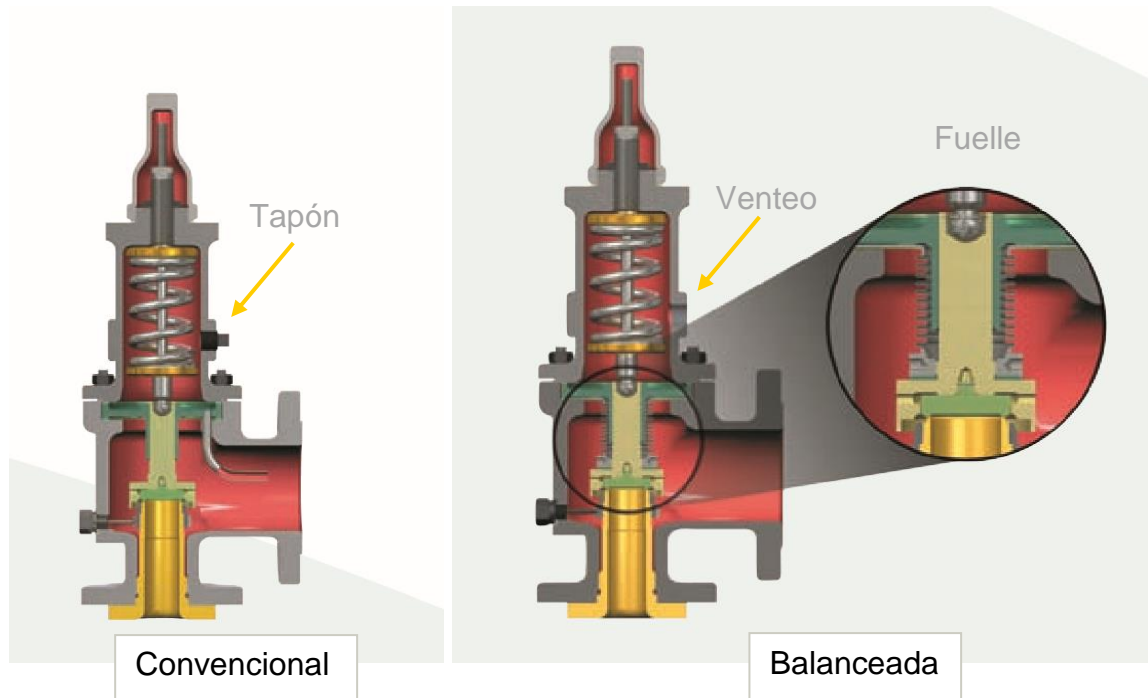
**2.8.4 Válvula de alivio de seguridad** Son válvulas que funcionan con un resorte de carga directa y pueden ser usadas bien sea como válvulas de alivio o de seguridad dependiendo de la aplicación. Se caracterizan por que abren completamente a una sobrepresión del 10% para servicio de gas o vapor y entre el 10 y 25% para servicio con líquidos.

**2.8.5 Válvula de alivio de seguridad convencional** Su principal característica es que su funcionamiento (presión de apertura, cierre y capacidad de alivio) es afectado directamente por los cambios en la contrapresión de la tubería de descarga. Se utilizan ampliamente en procesos que manejan material inflamable, tóxico o caliente.

**2.8.6 Válvula de alivio de seguridad balanceada** Este tipo de válvula es similar a una convencional pero incorpora un fuelle u otro medio para eliminar el efecto de la contrapresión en su funcionamiento. Físicamente es idéntica a una válvula convencional, sin embargo la presencia del fuelle requiere que el bonete permanezca venteado. La falla del fuelle por su parte permitirá que el fluido de proceso escape libremente por este orificio de venteo, por lo cual su aplicabilidad debe considerar estas condiciones. Se utilizan principalmente en procesos que manejan material inflamable, tóxico o caliente donde hay presencia de altas contrapresiones en la descarga de la válvula.

En la figura 11 se muestran las diferencias entre una válvula convencional y una balanceada por fuelle.

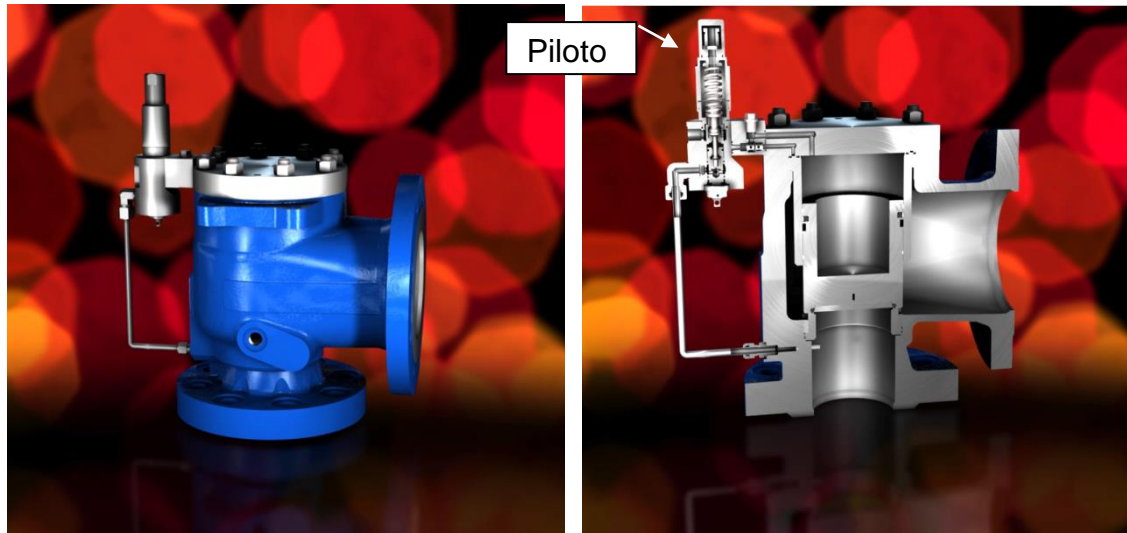
**Figura 10. Válvulas de alivio de seguridad**



Fuente: DRESSER ®. Consolidated Safety Relief Valve Complete Catalog

**2.8.7 Válvula de alivio de seguridad operada por piloto** Este tipo de válvula es una combinación entre el elemento mayor de alivio de presión o válvula principal y el elemento de control o piloto que es una válvula de alivio de presión auxiliar auto actuante.

**Figura 11. Válvulas operada por piloto**

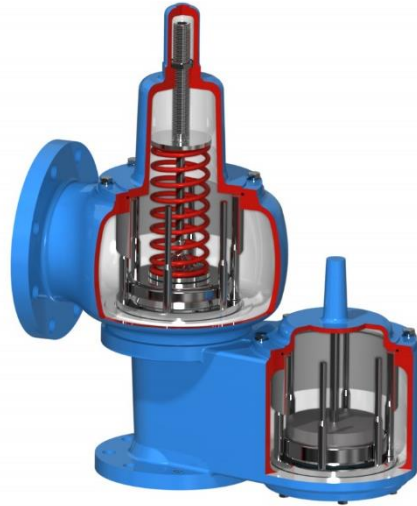


Fuente: Lesser valves – Pilot operated safety valve.

El piloto es una válvula con un resorte de carga directa que opera cuando su presión estática interna excede su presión de ajuste. Esto provoca que la válvula principal abra y cierre acorde a la presión del sistema. Debido a su flexibilidad, se utilizan para servicio a elevadas presiones, en grandes tanques de almacenamiento que operan a bajas presiones, cuando la contrapresión es muy elevada y se requiera una válvula balanceada (por diseño estas válvulas son inherentemente balanceadas), o cuando se requiera por proceso realizar la verificación de ajuste en sitio o en servicio.

**2.8.8 Válvula de alivio de presión y/o vacío** También conocidas como válvulas de venteo de presión o vacío, son dispositivos automáticos de alivio de presión y/o vacío que actúan por la presión o el vacío del equipo protegido. Pueden ser de tres tipos: operadas por contrapesas, operadas por piloto u operadas por una combinación de resorte y contrapesas (fig. 13). Normalmente se utilizan para proteger tanques de almacenamiento atmosféricos y de baja presión. Las válvulas compuestas por ambas protecciones en una misma unidad (presión y vacío) se conocen como válvulas de venteo de conservación.

**Figura 12. Válvula de venteo de conservación (combinación de contrapesas y resorte y protección por presión y vacío)**



Fuente: Pentair V&C - High capacity full lift pressure & vacuum relief valve

**2.8.9 Discos de ruptura** Son dispositivos de alivio de apertura pero sin cierre, sensibles a la presión y a la temperatura, que actúan por la presión diferencial estática entre la entrada y la salida del dispositivo y funcionan por medio de la ruptura o colapso de un disco. Generalmente está compuesto por el casete o alojamiento y el disco que puede ser plano, en forma de domo, o inversa.

Se utilizan para proteger la entrada de una válvula de alivio de presión cuando el fluido del sistema es corrosivo o cuando es muy viscoso y puede generarse taponamiento o polimerización, cuando se desea una respuesta más rápida que la que se obtiene con una válvula de alivio.

**Figura 13. Disco de ruptura**



Fuente: Continental disc corporation. LAMOT Rupture Discs.

### 3. RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo de los modelos de cálculo, se requirió en primera instancia conocer el universo de dispositivos instalados en la planta. Para ello se creó una base de datos en la cual se generó un inventario, tomando como referencia la información de los diagramas de tubería e instrumentación – (P&IDs por sus siglas en inglés).

Posteriormente se ubicaron los registros históricos de inspección y pruebas, los cuales fueron organizados cronológicamente para cada dispositivo. Esta información se digitalizó para poder almacenarla en el servidor de Equión, donde posteriormente pudiera ser consultada por cualquier interesado o con objeto de estudios de confiabilidad posteriores.

La información consolidada de cantidad y características básicas del universo de dispositivos se encuentra en la tabla 2.

El paso siguiente consistió en el diligenciamiento de la información técnica de cada dispositivo en el archivo de inventario. Allí se registraron datos como fabricante, modelo, serie, activo que protege, sistema relacionado, etc. y demás información de los registros de prueba (fig. 15). Básicamente se consignó el tipo de intervención realizada (*prueba de apertura o desensamble y reacondicionamiento (conocido también como overhaul)*), su resultado (*satisfactorio o no*), comentarios de soporte tales como la causa de la falla (*pase interno, fuga externa, falla al abrir, etc*) y la fecha de ejecución (fig. 16).

**Figura 14. Información técnica de cada dispositivo de alivio de presión**

Item	FACILIDAD	SISTEMA	P&ID	EQUIPO O LINEA PROTEGIDO POR EL PRD	TAG FINAL	MARCA	MODELO	TIPO DE ASIENTO	N° SERIE	TAMAÑO ENTRADA	TIPO
79	Floreña	K-38201C	FRD-F-MCF-MP-PRE-24-368-1-1 Z3	FL-V-1900	PSV-2806	CROSBY	253160152/S1	Blando	00/40983	1,5	Válvula de alivio de presión operada por piloto
107	Araguoney	METERING SKID	FRDFAMSMPPRES1002.1-2.9	10-PO-51017-A2A1	PSV-5131					0,75	Válvula de alivio de presión convencional
109	Araguoney	METERING SKID	FRDFAMSMPPRES1002.2-2.1	PROOVER	PSV-5121						Válvula de alivio de presión convencional
110	Araguoney	METERING SKID	FRDFAMSMPPRES1002.2-2.1	F-5104D	PSV-5121D	CROSBY	8151M68-4		11-41805	0,75	Válvula de alivio de presión convencional
111	Araguoney	FILTRATION	FRDFAMSMPPRES1003.1-1	F-5111A	PSV-5130					1,5	Válvula de alivio de presión convencional
112	Araguoney	FILTRATION	FRDFAMSMPPRES1003.1-1	10-PO-S1111-A2A1	PSV-5132A					4	Válvula de alivio de presión convencional
113	Araguoney	FILTRATION	FRDFAMSMPPRES1003.1-1	10-PO-S1111-A2A1	PSV-5132B					4	Válvula de alivio de presión convencional
114	Araguoney	FILTRATION	FRDFAMSMPPRES1003.1-1	F-5111B	PSV-5133					1,5	Válvula de alivio de presión convencional
115	Araguoney	TRAMPA DE RECIBO	FRDFFCFMPPLE22502.1-1.4	10-PO-22114-D2A1-VA U/S F-	PSV-2203					0,75	Válvula de alivio de presión convencional
117	Araguoney	CRUDE PIG LAUNCHER PHASE	FRDFFCFMPPRE22501.1-1.2	GN-ME-301	PSV-2223					0,75	Válvula de alivio de presión convencional
211	Floreña C6	PAQ COMP Z00001A	FRD-F-FWP-C6-PRE-00-002-1-2 Z2	FL-C6-V-101A	PSV-5C3A	MERCER	91-64K11788U1	Blando	745754	3	Válvula de alivio de presión convencional
58	Floreña	COMPRESION	02001-00-PID-111-1/1	23-C-102	23-PSV-2904 MP	AYLOR VALV	0902 N/E	Blando	NE	1	Válvula de alivio de presión convencional
134	Floreña	COMPRESION	02001-00-PID-111-1/3	23-C-101B	PSV-2904B	MERCER	81-3425111P11	Metálico	A64626	1,5	Válvula de alivio de presión convencional
138	Floreña		F-12-012	K-1201	PSV-1219	MERCER	81288211055	Metálico	13318	2	Válvula de alivio de presión convencional
141	Floreña	GAS	F1211M-M-01		PSV-0802	CROSBY	HFAS00892502	Metálico	1350	0,75	Válvula de alivio de presión convencional
131	Floreña	FUEL GAS SYSTEM	02001-00-PID-111-1/1	23-C-101 C	PSV-2903B	MERCER	81-17151U36P11	Metálico	48485	1	Válvula de alivio de presión convencional
81	Floreña	FUEL GAS SYSTEM	FRD-F-MCF-PU-PRE-46-358-1-2 Z2	1-GL-83-541	PSV-4650	CROSBY	951200NA	Blando	FAS26323-1	0,25	Válvula de alivio de presión convencional
127	Floreña	FUEL GAS	0065-00-PID-014		PSV-2604B	MERCER	81-14421036	Metálico	6819	1	Válvula de alivio de presión convencional
50	Floreña	AIR COMPRESSOR PAKAGE	0065-00-PID-025 Z7	FL-63-C-01B	PSV-2501B	JUNKLE VALV	6010E002-KM	Blando	002A	0,75	Válvula de alivio de presión convencional
132	Floreña	COMPRESION	02001-00-PID-111-1/2	23-C-102	PSV-2904A	MERCER	51-17151V36D11	Metálico	31817	1	Válvula de alivio de presión convencional
125	Floreña	COMPRESION	0065-00-PD-016	23-C-01D	PSV-1612	CROSBY	24312F1/S1	Blando	01/05702	1	Válvula de alivio de presión convencional

**Figura 15. Información Tipo de intervención realizada**

TAG FINAL	SET PRESSURE	FECHA COMISIONA	FECHA	TIPO DE MANTENIM	RESULTADO SET DE	RESULTADO HERMETICI	RESULTADO DESENSAM BLADA	Res 7	COMENTARIOS	FECHA	TIPO DE MANTENIM	RESULTADO SET DE	RESULTADO HERMETICI	RESULTADO DESENSAM BLADA	Res 8
PSV-2806	3280	20/07/2001						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5131	200	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5121		20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5121D	1350	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5130	1245	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5132A	200	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5132B	200	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5133	1245	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-2203	1245	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-2223	1925	20/06/2003						SIN FALLAS							NO SIN FALLAS
PSV-5C3A		15/04/2008						SIN FALLAS		01/03/2005	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS
23-PSV-2904 MP	175	20/06/2003						SIN FALLAS		13/06/2008	Preventivo	FALLA	OK	SI	13/06/2008
PSV-2904B	175	20/06/2003						SIN FALLAS		13/07/2008	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS
PSV-1219	25	15/04/2008						SIN FALLAS		03/09/2008	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS
PSV-0802	1350	15/04/2008						SIN FALLAS		28/05/2009	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS
PSV-2903B	75	20/06/2003	01/09/2009	Preventivo	OK	OK	NO	SIN FALLAS		03/08/2008	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS
PSV-4650	20	15/04/2008						SIN FALLAS		03/09/2009	Correctivo	OK	FALLA	SI	03/09/2009
PSV-2604B	75	20/07/2001						SIN FALLAS		13/09/2009	Preventivo	OK	OK		NO SIN FALLAS

Una vez consolidada la anterior información se determinó el número de mantenimientos realizados a partir de la fecha de comisionamiento a la fecha (hoy), la sumatoria de los tiempos entre falla y falla (TBF), tiempo desde la última intervención (fig. 14).

**Figura 16. Tiempos entre falla y falla (TBF)**

TAG FINAL	# MANTENIM	Falla 1 Meses	Falla 2 Meses	Falla 3 Meses	Falla 4 Meses	Falla 5 Meses	Falla 6 Meses	Falla 7 Meses	Falla 8 Meses	TIEMPO DESDE LA ÚLTIMA FALLA	ÚLTIMA FALLA HASTA HOY	ÚLTIMA INTERVENCIÓN	TIEMPO DESDE LA ÚLTIMA INTERVENCIÓN	TIPO INTERVENCIÓN
PSV-2806	0									15,30	186,20	20/07/2001	15,30	Pop test
PSV-5131	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5121	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5121D	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5130	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5132A	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5132B	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5133	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-2203	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-2223	0									13,39	162,87	20/06/2003	13,39	Pop test
PSV-5C3A	1									8,56	104,17	01/03/2005	11,69	Pop test
23-PSV-2904 MP	1	60,7								8,40	102,20	13/06/2008	8,40	Overhaul
PSV-2904B	1									13,39	162,87	13/07/2008	8,32	Pop test
PSV-1219	1									8,56	104,17	03/09/2008	8,18	Pop test
PSV-0802	1									8,56	104,17	28/05/2009	7,44	Pop test
PSV-2903B	2									13,39	162,87	01/09/2009	7,18	Pop test
PSV-4650	1	16,9								7,18	87,30	03/09/2009	7,18	Overhaul
PSV-2604B	1									15,30	186,20	13/09/2009	7,15	Pop test
PSV-2501B	1									6,89	83,87	15/12/2009	6,89	Overhaul
PSV-2904A	2									13,39	162,87	11/07/2010	6,32	Pop test

**Tabla 2 Listado de dispositivos de alivio de presión y características**

<b>Tipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Presión de trabajo</b>
Válvula de alivio de presión y vacío	3	1.5 psi
Válvula de alivio de presión operada por piloto	75	6200 psi
Válvula de alivio de presión convencional	129	2490 psi
Válvula de alivio de presión balanceada	8	1100 psi
Discos de ruptura	3	72,6 psi

### **3.1 PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL**

La estrategia de mantenimiento actual para las válvulas de seguridad se muestra en las figuras 18 a 20 y está basada en frecuencias predefinidas de intervención por tiempo y servicio. Contempla básicamente dos tipos de actividades:

- Prueba de disparo (apertura o pop test) y hermeticidad. Estas actividades se realizan en banco (cuando se desmonta del activo protegido) o en línea (cuando se prueba en sitio).
- Overhaul o desensamble para inspección de componentes y partes internas.

**Los intervalos para este tipo de pruebas están definidos entre 1 y 2 años para las pruebas de disparo y entre 1 y 5 años para el overhaul.**

El tipo de estrategia de mantenimiento es preventiva, pero no se retroalimentan los resultados de las pruebas ni se modifican los intervalos de intervención.

Figura 17. Frecuencia actual de overhaul

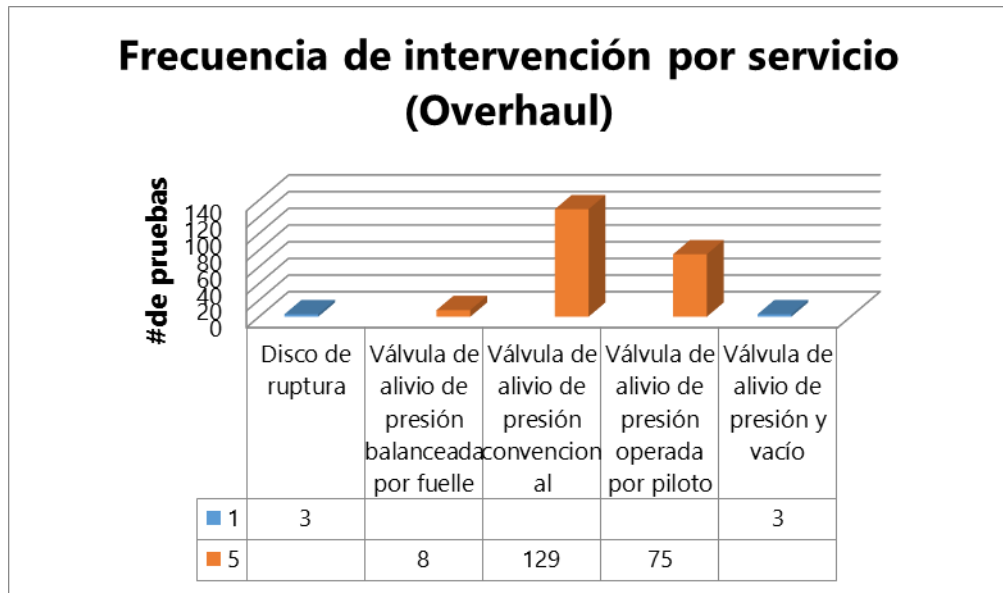
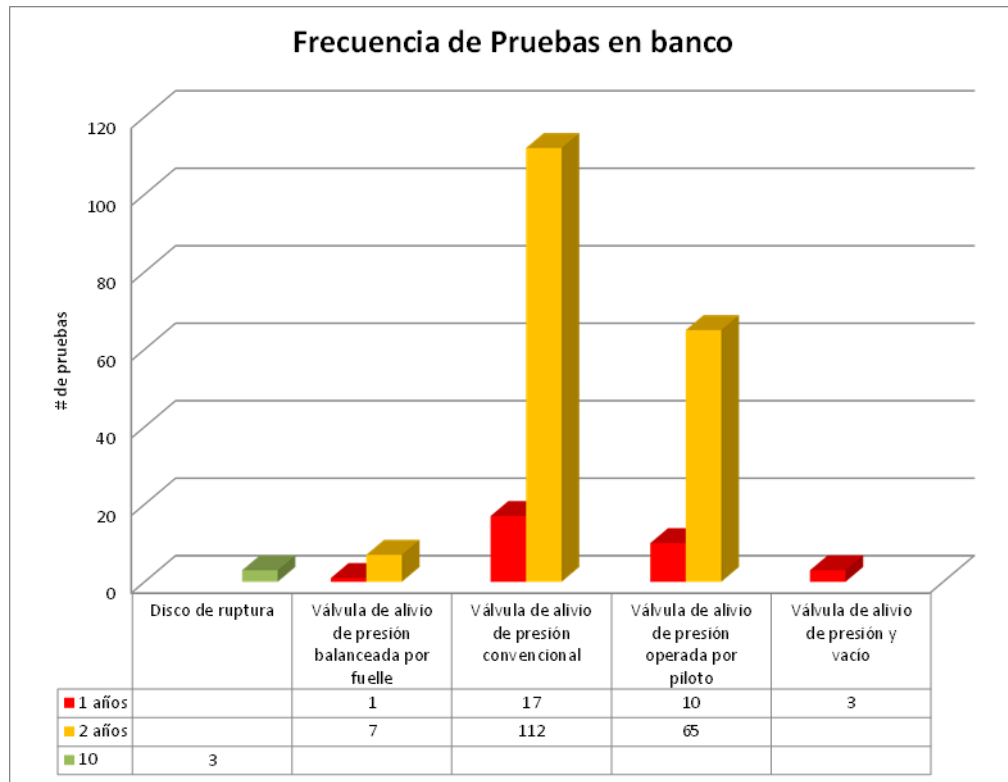
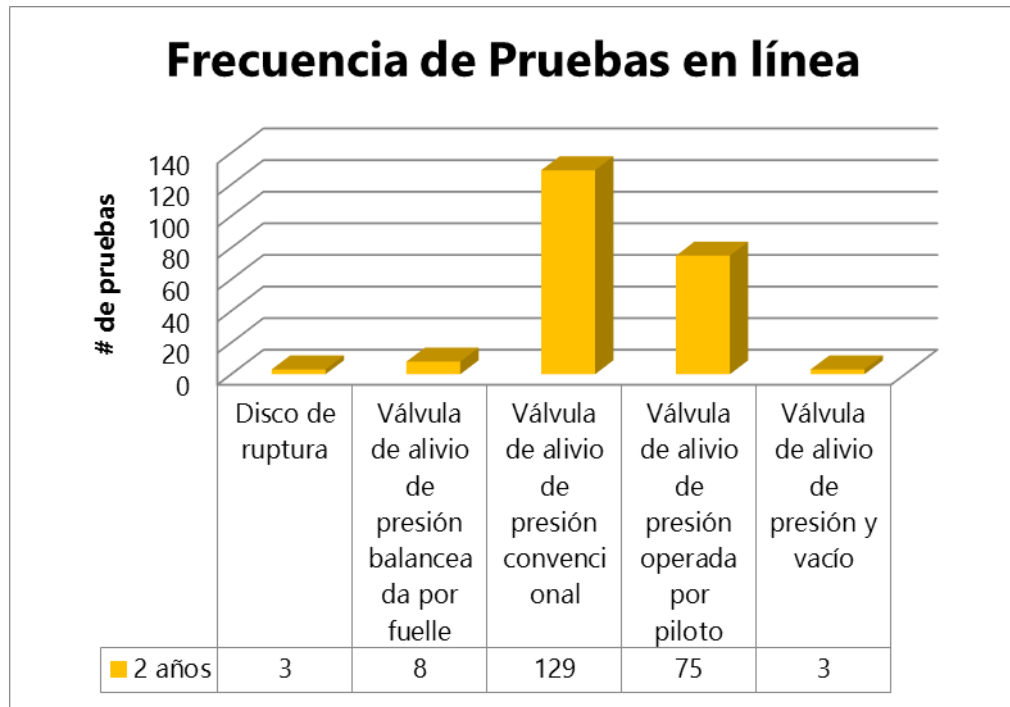


Figura 18. Frecuencia actual de prueba de desempeño en banco



**Figura 19. Frecuencia actual de prueba de desempeño en línea**



### 3.2 HISTORIAL DE FALLA

No se tiene un registro consolidado ni una base de datos de los eventos históricos de falla.

## **4. DESARROLLO DEL MODELO DE MANTENIMIENTO**

### **4.1 MODELO DE CONFIABILIDAD**

Confiabilidad es la probabilidad de que un componente o sistema se desempeñe satisfactoriamente la función para la que fue creado durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación establecidos. La confiabilidad es calidad en el tiempo.

Dado que no es suficiente que una PRD cumpla con las especificaciones y criterios de calidad sino que además es necesario que tenga un buen desempeño durante su vida útil es decir que sea confiable, se desarrollo un modelo de confiabilidad de las PRD's del campo Floreña mediante el análisis estadístico de fallas utilizando distribución Weibull como se describe a continuación:

**4.1.1 Cálculos Weibull** Para poder calcular los parámetros de la función Weibull se toman las PRD's que contengan 3 o más fallas, las PRD's que no presenten fallas tienen una confiabilidad del 100%, se crea una hoja Excel por cada PRD analizada. El método que se escogió para estimar los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull fue el de mínimos cuadrados o método gráfico.

**4.1.2 Cálculo de los parámetros de Weibull por método de los mínimos cuadrados**

**4.1.3 Rango de la mediana** El método de los mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala, mediante la transformación logarítmica de la función de distribución acumulativa  $F(t)$ . Este estimador, llamado rango de la mediana, es un estimador no paramétrico basado en el orden de los fallos, los

datos se deben ordenar de menor a mayor. Para mostrar detalladamente el cálculo de los parámetros de confiabilidad y análisis de resultados se tomara como ejemplo la PSV-0131, la figura 21 muestra el número de fallas presentadas (i), F(t) y TBF.

**Figura 20. Cálculo de (i), F(t) y TBF para PSV-0131**

PSV-0131				NID =
i	Falla	F(t)	F*(t)	TBF (meses)
		0		0
1	0,30	0,205882	21%	0,30
2	7,80	0,5	50%	7,80
3	153,40	0,794118	79%	153,40

El rango de la mediana se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$RM(x_i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

*Ecuación 7*

Donde **n** es el número total de datos y **i** el consecutivo de datos que se evalúa, reemplazando se tiene:

$$RM(x_1) = \frac{1 - 0,3}{3 + 4} = 0,2058824$$

$$RM(x_2) = \frac{2 - 0,3}{1 + 4} = 0,5$$

$$RM(x_3) = \frac{3 - 0,3}{3 + 4} = 0,75$$

**4.1.4 Cálculo de los parámetros  $\beta$  (BETA) y  $\eta$  (ETA)** El método de los mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala mediante la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulativa.

Se parte de la función de distribución de Weibull:

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

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

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

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

Aplicando logaritmo natural a ambos lados se tiene:

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \ln\left(e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}\right)$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \ln\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \beta \ln\left(\frac{x}{\eta}\right)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta (\ln(x) - \ln(\eta))$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\eta)$$

*Ecuación 8*

La fórmula anterior representa una ecuación lineal de la forma  $\mathbf{y} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{b}$ , la cual es una recta de regresión con los siguientes parámetros:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right); \alpha = \beta; x = \ln(x); b = \beta \ln(\eta)$$

*Ecuación 9*

Se concluye que el parámetro de forma  $\beta$ , es la pendiente de la recta de regresión.  $\mathbf{F(x)}$  toma los valores del rango de mediana, el parámetro de escala  $\eta$ , está en función del intercepto  $\mathbf{b}$  de la recta de regresión y del parámetro de forma  $\beta$ , por lo anterior se tiene:

$$b = -\beta \ln(\eta)$$

$$-\frac{b}{\beta} = \ln(\eta)$$

$$e^{(-b/\beta)} = e^{\ln(\eta)}$$

Quedando  $\eta$  como:

$$\eta = e^{(-b/\beta)}$$

*Ecuación 10*

Reemplazando las fórmulas anteriores para nuestro caso se tiene:

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

$$y_1 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - 0,2058823}\right)\right) = -1,4674$$

$$y_2 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - 0,5}\right)\right) = -0,3665$$

$$y_3 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - 0,794117647}\right)\right) = 0,45777$$

$$x = \ln(x)$$

$$x_1 = \ln(0,30) = -1,2040$$

$$x_2 = \ln(7,80) = 2,0541$$

$$x_3 = \ln(153,40) = 5,0330$$

$$X \times Y$$

$$X_1 \times Y_1 = -1,2040 \times -1,4574 = 1,7667118838$$

$$X_2 \times Y_2 = 2,0541 \times -0,366 = -0,752862889$$

$$X_3 \times Y_3 = 5,0330 \times 0,4577 = 2,303676073$$

$$X^2$$

$$X_1^2 = 1,44955$$

$$X_2^2 = 4,21942$$

$$X_3^2 = 25,33158$$

Con el fin de garantizar que los datos provienen de una distribución continua normal se aplicó la prueba de Kolmogorov – Smirnov (fig. 22).

**Figura 21 Comprobación de bondad**

Prueba Smirnov-Kolmogorov	R2 Coeficiente de determinación	r Coeficiente de correlación
Los datos de la muestra se ajustan a la distribución dada por F(t)	0,99676052	0,998378946
	No requiere validación de datos	

Ahora se calculan los parámetros que rigen la función Weibull (Beta y Eta), para calcular está pendiente primero se debe determinar los promedios de los valores X y Y.

$$\bar{X} = 1,96107$$

$$\bar{Y} = -0,45873$$

$$\bar{X}^2 = -0,45873$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N X_i * Y_i - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - N * \bar{X}^2}$$

*Ecuación 11*

$$\beta = \frac{3,317525022 - 3 * 1,96107 * (-0,45873)}{31,00056 - 3 * 3,8457822234}$$

$$\beta = 0,309$$

Para calcular el parámetro Eta ( $\eta$ ) primero se debe hallar el intercepto ( $b$ ) de la función linealizada.

$$b = \bar{Y} - \beta * \bar{X}$$

*Ecuación 12*

$$b = -0,45873 - 0,309114202 + 1,96107$$

$$b = -1,064928$$

Con los anteriores valores se procede a calcular el **MTBF** en días para la PRD a partir de la siguiente ecuación:

$$MTBF = \eta * Gamma \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

*Ecuación 13*

$$MTBF = 31,3463318 * Gamma \Gamma \left( 1 + \frac{1}{-0,309114202} \right)$$

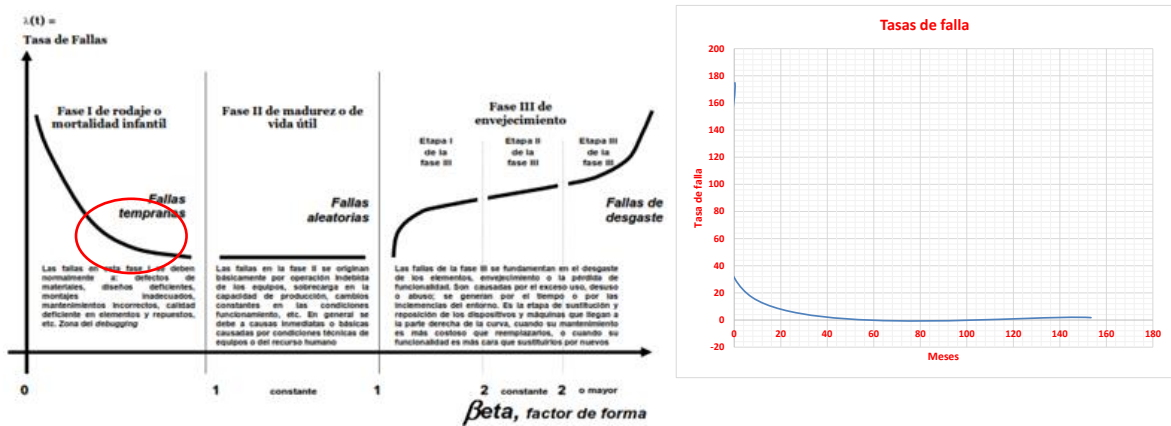
$$MTBF = 254,622044$$

Con el beta obtenido en confiabilidad se determina en que punto de la curva de Davies se encuentra la PRD, al estar el beta dentro del rango  $\beta < 1$  se concluye que la PRD se encuentra en la fase 1 denominada como mortalidad infantil (tasa de falla decreciente), las fallas en esta fase no es el desgaste el causante principal de las falla sino más bien son los errores humanos los causantes de estas, pueden ser montajes inadecuados, mantenimientos incorrectos, calidad deficiente en elementos, defectos de materiales, diseños deficientes, y repuestos.

Para finalizar el análisis se grafican las funciones de confiabilidad, desconfiabilidad (fig. 24), y tasa de fallas de Weibull (fig. 25). Estas graficas muestran las curvas del comportamiento esperado de la PRD después de la última reparación.

Comparando la curva de tasa de fallas con la curva de la bañera podemos confirmar que la PRD se encuentra en fase 1 denominada como mortalidad infantil (fig. 23).

**Figura 22. Comparación entre la curva de la bañera y tasa de fallas de Weibull de la PSV – 0131.**



**Figura 23. Curvas de Confiabilidad y Desconfiabilidad de Weibull PSV- 0131**

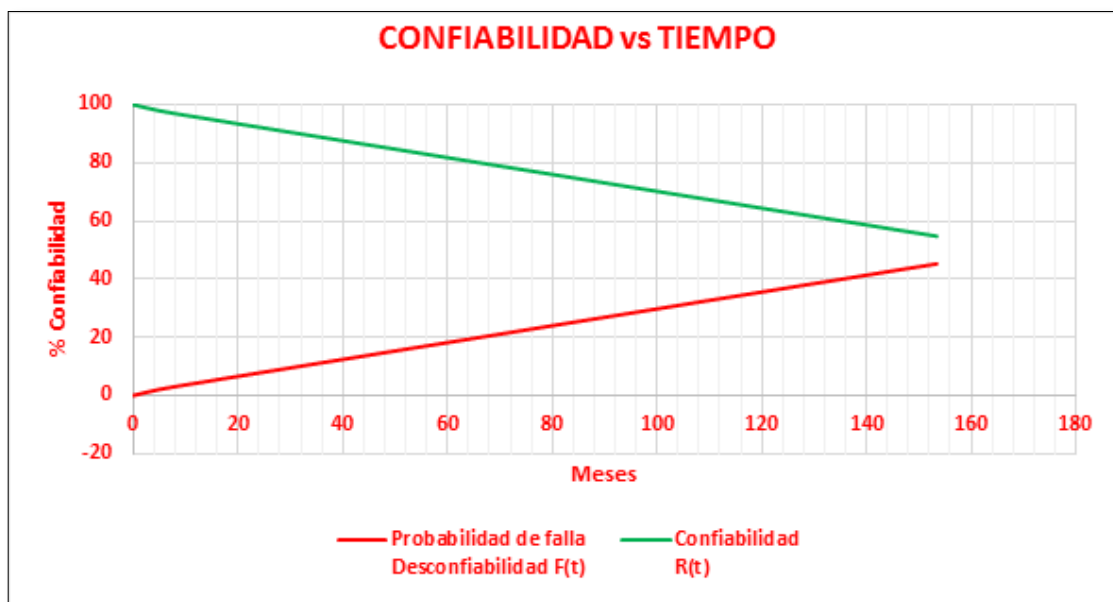
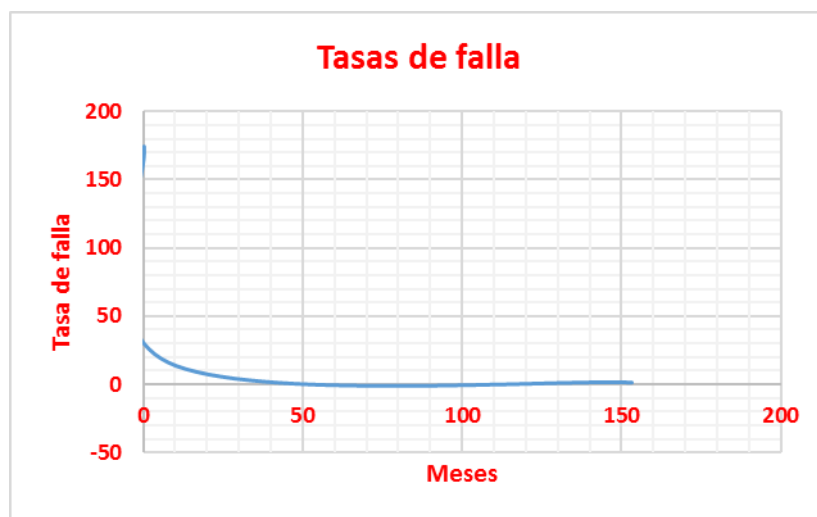


Figura 24. Curva de tasa de fallas de Weibull PSV- 0131



Finalmente con el modelo de confiabilidad permitió analizar todas las tasas de falla presentadas en la PRD y establecer el intervalo de inspección, para el caso anterior se definió realizar un mantenimiento de tipo correctivo con próxima fecha

de overhaul de 23/10/2019, garantizando un 79% de probabilidad de que la válvula funcione sin fallas hasta la próxima fecha de inspección.

El anexo 4 muestra el modelo de confiabilidad para cada una de las PRD's analizadas.

## **4.2 MODELO DE RIESGO**

**4.2.1 Metodología del RBI** En este estudio la metodología de API-RBI se fundamentó en las recomendaciones de la segunda edición de API RP 580 (2016).

Con base en el desempeño, estado actual de integridad, condición de servicio y frecuencia de demanda, se generó un modelo para valorar el riesgo de los PRD's.

El modelo calcula el riesgo de falla al abrir como resultado de la probabilidad de falla en demanda y la consecuencia de falla del activo que está siendo protegido por el PRD debido a escenarios de sobrepresión (fuego, bloqueo en la descarga, alivio térmico, falla en la válvula de control, etc.).

La intención general del modelo no es evaluar el diseño ni la capacidad de alivio de los PRD's, sino establecer su nivel de riesgo y definir las frecuencias de inspección y pruebas necesarias para asegurar su confiabilidad conforme a los requisitos técnicos y nivel de riesgo aceptable por la organización (Equión).

**4.2.2 Identificación de modos de falla** La mayor preocupación con los dispositivos de alivio de presión y la razón principal por la que se requiere la implementación de rutinas de inspección y pruebas es la falla del dispositivo para aliviar durante un evento de sobrepresión lo que puede causar daño del activo protegido por el PRD, provocando una pérdida de contención.

Es importante determinar la definición de falla de un PRD, ya que difiere de la definición de falla para otros equipos estáticos.

Falla se define como una deficiencia en el PRD al abrir durante una situación de emergencia causando una condición de sobrepresión en el activo protegido, resultando en pérdida de contención.

Para los PRD's los modos de falla se agrupan en falla al abrir y fuga.

Falla al abrir para este modelo incluye:

- Apertura parcial de la válvula
- Atascamiento (la válvula no abre cuando se presuriza incluso hasta el 150% del CDTP)
- Apertura por encima del set de presión (fuera de los criterios de aceptación del código de construcción del equipo protegido)

La fuga incluye:

- Pase interno
- Atascamiento del disco en posición abierta
- Apertura prematura de la válvula

**4.2.3 Probabilidad de falla PoF** La probabilidad de falla al abrir es el producto de la siguiente ecuación:

$$Pof = Pfod * DR * Pfap$$

*Ecuación 14*

Donde,

*Pof* probabilidad de falla al abrir

*Pfod* probabilidad de falla en demanda

*DR* tasa de demanda

*Pfap* probabilidad de falla del activo protegido, calculada en el estudio de riesgo ya realizado al equipo estático y dependiente de los mecanismos de daño presentes en el sistema, tipo de material y condiciones de servicio.

La probabilidad de falla en demanda (*Pfod*) se determinó a partir de la información de inspección y prueba suministrada por Equión (registros de prueba), utilizando las curvas de densidad de falla acumulada de Weibull en función del tiempo de servicio. La distribución de Weibull es una función estadística basada en una distribución de probabilidad continua y se determina por la siguiente ecuación:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

*Ecuación 15*

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

*Ecuación 16*

Donde,

*t* = Variable dependiente del tiempo, (años)

*η* = Parámetro de vida característico al tipo de PRD, (años). Cuando  $\beta = 1$ , *η* es equivalente al tiempo medio entre fallas, MTTF (calculado en el modelo de confiabilidad)

$\beta$  = Factor de forma, establecido por defecto como 1.8 para cada tipo de dispositivo conforme se indica en API 581 Tabla 7.5<sup>8</sup>, (adimensional)

$e$  = Base de los logaritmos naturales, (2.718281...)

En este modelo se ajustó el parámetro característico “ $\eta$ ” a las condiciones particulares de cada PRD “ $\eta$  *upd*” tomando como referencia la última fecha de intervención (o el MTBF calculado en el modelo de confiabilidad, lo que sea menor). Para los casos donde no se presentaron registros de mantenimiento, el parámetro característico “ $\eta$ ”, no sufrió modificación.

Nota: el parámetro característico “ $\eta$ ” fue determinado en API 581 utilizando la información de la tasa de falla de la industria. La base de datos incluyó aproximadamente 4300 puntos de información de pruebas en banco, donde la mayoría de la información indicó un desempeño satisfactorio durante el intervalo en el que el PRD estuvo en servicio<sup>9</sup>.

En la tabla 3 se muestra la categorización por severidad del servicio, y en la tabla 4 los factores de ajuste del medio utilizados en el modelo.

**Tabla 3 Severidad del servicio**

<b>Servicio</b>	<b>Fluidos incluidos en la categoría</b>
Leve	Aire, Nitrógeno, LPG, Agua del sistema contra incendios, Diesel
Moderado	Gas de proceso, Fuel Gas, Condensado, Glicol (MEG, TEG, EG), Crudo fuera de especificación, Agua producida, Agua de inyección, Aceite caliente

<sup>8</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection. API 580: 2016. 3ed. NW, Washington: API, 2016. 164p

<sup>9</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Technology. API 581: 2016. 3ed. NW, Washington: API, 2016. 71p

Severo	Amina, Fluido multifásico, Crudo
--------	----------------------------------

**Tabla 4 Factores de ajuste del parámetro característico  $\eta$**

Descripción	Valor de ajuste al parámetro $\eta$
Vibración	1.0
Chattering o cascabeleo	0.5
Excesiva demanda (>5 veces por año)	0.5

Fuente: American Petroleum Institute, API 581 Tabla 7.6

La tasa de demanda ( $DR$ ) se calculó para los siguientes escenarios de demanda por sobrepresión: descarga bloqueada, fuego y alivio térmico con controles administrativos<sup>10</sup>.

La frecuencia de los eventos iniciadores, así como los factores de reducción de la tasa de demanda fueron tomados de la tabla 7.2 de API 581 (16).

**Tabla 5 Frecuencia de los eventos iniciadores**

Caso de demanda por sobrepresión	Frecuencia del evento	$EF$ (eventos/año)	$DRRF$
Incendio	1 cada 250 años	0.004	1.0
Descarga bloqueada con controles administrativos en sitio	1 cada 100 años	0.01	1.0
Descarga bloqueada sin controles administrativos	1 cada 10 años	0.1	1.0
Alivio térmico con controles administrativos en sitio	1 cada 100 años	0.01	1.0
Alivio térmico sin controles administrativos	1 cada 10 años	0.1	1.0

<sup>10</sup> Controles administrativos para válvulas de aislamiento son procedimientos cuya intención es asegurar que las acciones del personal no comprometan la protección por sobrepresión de un equipo.

Falla de la válvula de control, el evento iniciador es en la misma dirección de la posición de falla normal de la válvula de control (ej. Falla segura)	1 cada 10 años	0.1	1.0
Ruptura de uno de los tubos en un intercambiador de calor	1 cada 1000 años	0.001	1.0

Fuente: American Petroleum Institute, API 581 Tabla 7.2

La efectividad de la inspección es un criterio que busca confirmar las tasas de falla en los PRD's. Se basa en la habilidad de la inspección para predecir adecuadamente el estado de un dispositivo bien sea que pase o no la prueba.

Las limitaciones en la habilidad de un programa de inspección para mejorar la confianza en los resultados de las tasas de falla resultan de la incapacidad de algunos métodos de prueba para detectar y cuantificar el daño. Algunas de estas limitaciones comprenden:

- Procedimientos inadecuados de inspección
- Falta de entrenamiento del personal ejecutante
- Análisis inadecuado de los resultados

Para representar de manera precisa el desempeño real de un PRD en un caso de demanda por sobrepresión, se utilizó un criterio denominado "Nivel de confianza en la inspección" que utiliza probabilidades condicionales basadas en la opinión del personal experto. Estos valores reflejan la confianza de que el resultado de una inspección podrá predecir el desempeño de un dispositivo en demanda.

Por ejemplo: el 90% de la efectividad asociada a una prueba en banco satisfactoria cuando el nivel de efectividad de la inspección ha sido clasificado como "Altamente efectiva", significa que hay un 90% de probabilidad de que la válvula hubiera abierto en demanda cuando estaba instalada en servicio. De esta forma, sólo queda un 10% de probabilidad que el PRD hubiera fallado en demanda durante su operación.

Por el contrario, si el PRD falla durante la prueba, para el mismo nivel de efectividad en la inspección, el 95% de factor de confianza pasa a ser 95% de posibilidades que el PRD hubiera fallado en demanda durante el servicio.

Las tablas 6 y 7 relacionan la información utilizada en el desarrollo del modelo de riesgo.

**Tabla 6 Efectividad de la inspección**

Efectividad	Descripción de la inspección
Altamente Efectiva	La prueba "como se recibió" realizada en banco y/o en sitio documentó apropiadamente la presión de apertura, hermeticidad y reasiento, se reportó detalladamente el estado o condición de los componentes durante el desensamble (overhaul), y Se realizó inspección interna de la tubería U/S y D/S del PRD y se registró el estado de taponamiento, corrosión, etc.
Pobrementemente Efectiva	El registro consultado no cumple con "Altamente Efectiva" ni con "No Efectiva" Se tienen registros de monitoreo periódico del <b>disco de ruptura</b> en el espacio anular entre este y la válvula de alivio de presión.
No Efectiva	No se realizó prueba de apertura (disparo). No se documentó el detalle de los componentes internos del <b>disco de ruptura</b> .

**Tabla 7 Factores del nivel de confianza en la inspección**

Resultado de la inspección	No efectiva	Pobremente efectiva	Altamente efectiva
Pasa, $CF_{pass}$	Sin crédito	0.5	0.9
Falla, $CF_{fail}$	Sin crédito	0.7	0.95

Fuente: American Petroleum Institute, API 581, Tabla 7.8

La probabilidad de falla del activo protegido ( $P_{fap}$ ) se obtuvo del estudio previo de riesgo - RBI para equipo estático con las siguientes categorías ajustadas a la matriz de riesgo de Equión:

**Tabla 8 Categorías de probabilidad para equipo estático**

Categoría	Probabilidad
1	$\leq 6.12e^{-6}$
2	$6.12e^{-6}$ a $6.12e^{-5}$
3	$6.12e^{-5}$ a $3.06e^{-4}$
4	$3.06e^{-4}$ a $3.06e^{-3}$
5	$> 3.06e^{-3}$

Como resultado del análisis de estas variables, se asignaron las siguientes categorías de POF a los 218 PRD's:

**Tabla 9 Resultado general del cálculo de la POF**

Categoría de POF	Cantidad de PRD's	Manejador principal / razón
5	0	Efectividad de la inspección y POF del activo asociado
4	1	
3	2	
2	51	
1	164	

**4.2.4 Consecuencia de falla CoF** Ya que la metodología para el cálculo de la consecuencia es similar para los dispositivos de alivio de presión y para sus activos asociados, se definió de manera conservativa utilizar la consecuencia

calculada previamente en el estudio de riesgo para el activo protegido por el PRD (equipo o línea de tubería).

Este valor se calculó para escenarios como lesiones al personal, daño del equipo, pérdida de producción, pérdida de inventario, costos ambientales y costos de reparación para eventos tales como incendio, explosión, exposición tóxica, etc.

**Tabla 10 Categorías de COF utilizadas en el estudio**

<b>Categoría de COF</b>	<b>Área de afectación</b>	<b>Fatalidades o lesiones</b>	<b>Costo</b>
A	< 100 ft <sup>2</sup>	Primeros auxilios	Menor a 10k USD
B	100 ft <sup>2</sup> a 1000 ft <sup>2</sup>	Lesiones incapacitantes parciales con ausencia del trabajo	20k a 100k USD
C	1000 ft <sup>2</sup> a 3000 ft <sup>2</sup>	Lesiones que requieren hospitalización o tratamiento	100k a 1M USD
D	3000 ft <sup>2</sup> a 10000 ft <sup>2</sup>	5 o más lesionados con incapacidad permanente	1M a 10M USD
E	> 10000 ft <sup>2</sup>	1 o más fatalidades	> 10M USD

La ventaja de utilizar estos valores de COF fue asegurar coherencia en la información relacionada con el impacto de un evento, habiendo determinado el estado de daño presente en cada activo.

A continuación se muestra la distribución de consecuencia de falla asociada a cada PRD.

**Tabla 11 Resultado general de la asignación de CoF**

<b>Categoría de COF</b>	<b>Cantidad de PRD's</b>	<b>Manejador principal / razón</b>
E	0	Depende de la categoría del fluido del activo protegido por el PRD
D	171	
C	11	

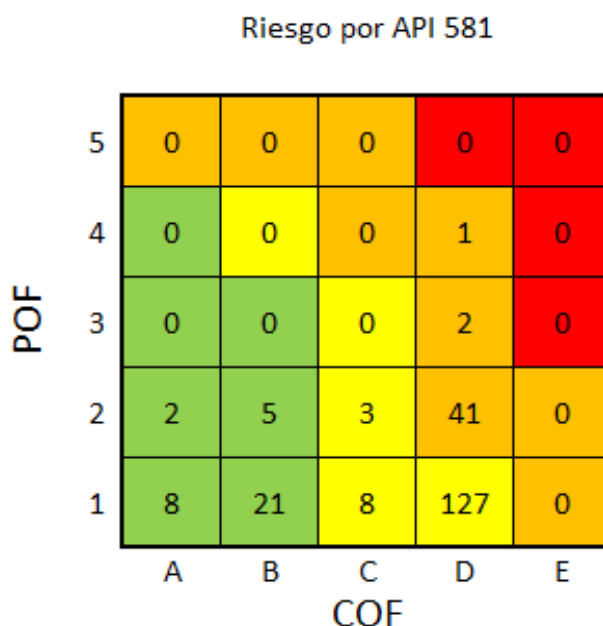
B	26	Servicios utilitarios
A	10	Servicios utilitarios (nitrógeno, aire)

**4.2.5 Valoración del riesgo** Una vez determinada la probabilidad de falla en demanda y la consecuencia asociada a cada dispositivo, se calculó el riesgo como sigue:

$$Riesgo\ total = Pof \times Cof$$

Como resultado se obtuvo la distribución global del riesgo asociado a los PRD's, el cual se representa de una manera gráfica por medio de la matriz de riesgo de la figura 15. En la tabla 12 se muestran los resultados del ranking de riesgo para cada nivel.

**Figura 25. Matriz de riesgo - valoración de criticidad de los PRD's**

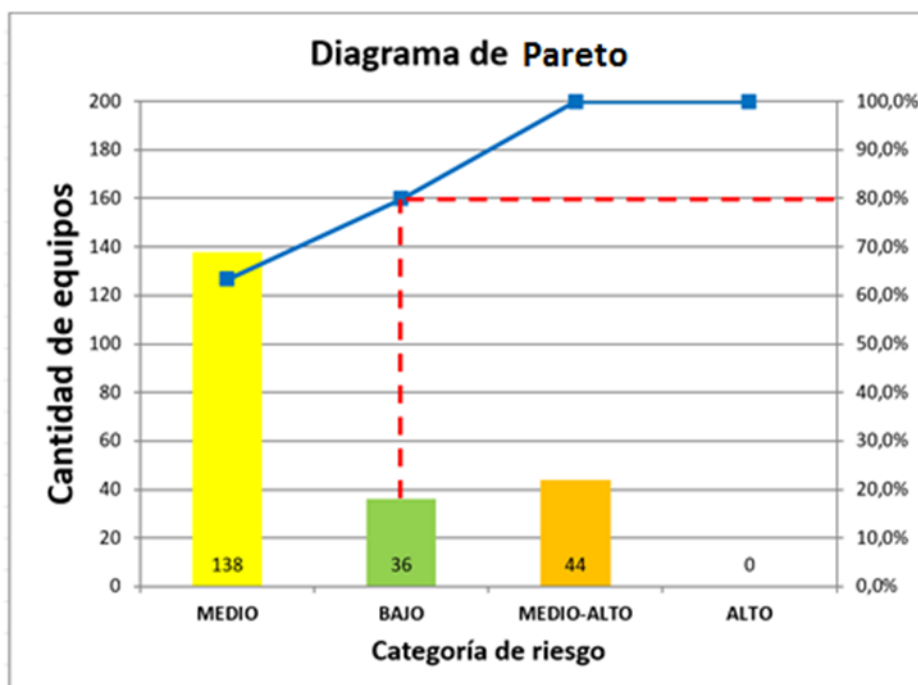


**Tabla 12 Clasificación general basada en el riesgo calculado por API 581**

Clasificación de riesgo	Cantidad de PRD's
Bajo	36
Medio	138
Medio-Alto	44
Alto	0

Una de las maneras prácticas para tomar decisiones respecto al orden de prioridades de inspección es por medio de un diagrama de Pareto. En la figura 27 se ilustra el nivel de riesgo acumulado, y se observa que el 80% del riesgo está representado en el 20% de los dispositivos (los cuales se encuentran en las categorías media-alta y baja).

**Figura 26 Diagrama de Pareto para el riesgo global de los PRD's**



Con esta información se procedió a establecer el orden de prioridades de inspección respecto al nivel de criticidad, para enfocar los recursos a los PRD's de riesgo medio-alto y a todos los que presentan una confiabilidad menor al 85% o no tienen registros de inspección. Los resultados se detallan en el capítulo 5 Estrategia propuesta – Plan de mantenimiento.

**4.2.6 Asunciones / Comentarios al modelo de riesgo** En la preparación de la base de datos para el estudio de RBI se realizaron ciertas asunciones para construir el modelo de valoración de riesgo. Cierta nivel de estimación y asunciones prudentes se necesitaron para completar el análisis.

A continuación se resumen las asunciones generales utilizadas en este trabajo:

**Tabla 13 Asunciones y comentarios**

Ítem	Descripción	Fuente
Capacidad de alivio	<p><b>Todos los PRD's</b>  <u>Según el diseño</u>  * Para propósitos de este estudio, se asume que todos los dispositivos de alivio de presión han sido diseñados de acuerdo con API 521 y fueron dimensionados, seleccionados e instalados de acuerdo con API 520.</p>	Asunción
Caso de diseño	<p><b>Válvulas de alivio de presión</b>  <b>Válvulas de seguridad</b>  <b>Discos y pines de ruptura</b>  <u>Según el P&amp;ID</u>  * Si el caso de diseño no está disponible, entonces se asume el caso de descarga bloqueada.</p>	Asunción
Inspección y pruebas del PRD	<p><b>Todos los PRD's</b>  <u>Registro de mantenimiento</u>  * Se asume que los resultados de todas las pruebas en banco o línea realizadas en condición "como se recibió", son la determinación real del desempeño del PRD en la unidad.</p>	Asunción
Desensamble para inspección interna (overhaul) o fecha inicial de sustitución	<p><b>Todos los PRD's</b>  <u>Registro de mantenimiento</u>  * Si un PRD ha sido desensamblado y sus componentes internos se inspeccionaron, se asume que el PRD se retornó a condición "como nueva".  La fecha de la última inspección se actualizará para revelar la condición del dispositivo. De esta manera el tiempo de servicio se basará en la última fecha de inspección en la que se realizó el overhaul.  * Para los casos donde no se obtuvo registro de mantenimiento del PRD, se asume que la fecha de la última intervención corresponde a la fecha de comisionamiento o entrada en servicio del sistema.</p>	Asunción
Parámetro actualizado a las	<p><b>Todos los PRD's</b>  <u>API 581 (2016)</u>  * Excepto cuando el PRD ha sido desensamblado</p>	API 581

Ítem	Descripción	Fuente
<p>condiciones de mantenimiento (<math>\eta_{upd}</math>)</p> <p>(ajuste del tiempo medio entre fallas - MTTF)</p>	<p>en su último mantenimiento, si el tiempo transcurrido desde la última inspección registrada es inferior a 1 año, no se dará crédito al registro y el parámetro <math>\eta_{upd}</math> se tomará como el parámetro característico de Weibull (<math>\eta</math>).</p> <p>Únicamente se dará crédito al MTBF calculado en el modelo de confiabilidad cuando este sea menor al <math>\eta_{upd}</math>, ya que este parámetro es más conservativo para el estado de integridad del sistema.</p>	
<p>Presencia de un disco de ruptura aguas arriba</p>	<p><b>Discos de ruptura en combinación con válvulas de seguridad</b></p> <p><u>API 581 (2016)</u></p> <p>* Cuando en un sistema el PRD opere en conjunto con un disco de ruptura U/S, la severidad del fluido será moderada, sin importar la clasificación del servicio que previamente haya sido asignada.</p>	<p>API 581</p>
<p>Efectividad de la inspección</p>	<p><b>Todos los PRD's</b></p> <p><u>Registro de mantenimiento</u></p> <p>* Para los casos donde no se obtuvo registro de mantenimiento del PRD, se asume que la inspección no fue efectiva.</p>	<p>Asunción</p>
<p>Consecuencia de falla</p>	<p><b>Todos los PRD's</b></p> <p><u>RBI Equipo estático</u></p> <p>Si la CoF calculada no se puede asociar al activo protegido, entonces el criterio es el siguiente:</p> <p>* Si la información no está disponible se asume basado en un activo con similar servicio y probabilidad de falla.</p>	<p>Asunción</p>
<p>Efecto de la inspección en las curvas de riesgo</p>	<p><b>Todos los PRD's</b></p> <p><u>Inspección con desensamble (overhaul)</u></p> <p>Debido a que los PRD's normalmente son desensamblados durante los intervalos de servicio, el riesgo de falla deberá bajar hasta cero; esta asunción se realiza, ya que se considera que el PRD vuelve a su condición "como nueva".</p> <p><u>Inspección sin desensamble</u></p>	<p>Asunción</p>

Ítem	Descripción	Fuente
	<p>En casos donde la prueba “como se recibió” es satisfactoria y por consiguiente no se considera necesario realizar el desensamble para inspección interna (overhaul), únicamente se ganará la confianza de que el PRD estaba operando adecuadamente, sin embargo, como no se retornó a su condición “como nueva”, únicamente se modificará la probabilidad de falla (ajustando el parámetro <math>\eta</math> en la curva de Weibull) pero el riesgo no disminuirá hasta cero, por lo tanto, no se podrá incrementar el intervalo de prueba.</p>	

## 5. ESTRATEGIA PROPUESTA – PLAN DE MANTENIMIENTO

### 5.1 PREPARACIÓN DE LOS PLANES DE INSPECCIÓN

Con base en los resultados de los modelos de riesgo y confiabilidad donde se detectaron aquellos dispositivos con una baja confiabilidad o un nivel de riesgo medio-alto, se generó la siguiente estrategia para la gestión del mantenimiento:

Se consideraron los siguientes tipos de inspección:

- Intervalo de prueba de desempeño (prueba de apertura “pop test” y hermeticidad en banco o en línea).
- Intervalo de servicio (desensamble e inspección de componentes internos y reacondicionamiento).
- Intervalo de inspección visual en servicio.

Con excepción de las válvulas de alivio de presión y vacío y los discos y pines de ruptura, en este estudio los intervalos mínimos y máximos fueron dos (2) y diez (10) años respectivamente.

El mínimo intervalo de (2) años reconoce que intervalos menores a este pueden no ser prácticos (con excepción de aquellas válvulas que presentaron una alta probabilidad de falla). El intervalo máximo de (10) años corresponde a la guía de los códigos de inspección API 510 y 570, que para Equión son de obligatorio cumplimiento.

En aquellos casos donde no se obtuvo evidencia de ninguna intervención desde el comisionamiento (o entrada en servicio), el intervalo propuesto fue de 1 año con fecha máxima de ejecución de Overhaul el 29/03/2017.

A continuación se relacionan los criterios de selección de los intervalos de prueba e inspección para todos los PRD's:

**Tabla 14 Criterios para la definición de los planes de inspección**

Ítem	Descripción	Fuente
Planes de inspección	<p><b>Todos los PRD's</b></p> <p>La frecuencia de la prueba de desempeño (pop test), será la menor entre la frecuencia actual de prueba o la de servicio para cada PRD. Entiéndase por servicio el desensamble para inspección interna u overhaul.</p> <p>Se deberán considerar las siguientes premisas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Si los registros de mantenimiento muestran que el PRD ha presentado alguna falla (set alto, set bajo, pase interno, taponamiento, atascamiento, etc.), la frecuencia de prueba establecida en la estrategia actual se deberá alinear al resultado del modelo de confiabilidad llevado a cabo en este estudio.</li> <li>* Si el PRD no ha registrado ninguna falla, la frecuencia actual se duplicará, pero no podrá exceder 10 años.</li> <li>* El intervalo de servicio (overhaul) será el menor entre 3 intervalos de prueba de desempeño o 10 años, sin embargo si el PRD posee componentes internos blandos (soft goods), el máximo intervalo de servicio será 5</li> </ul>	National Board <sup>11</sup>

<sup>11</sup> Se toma como guía la recomendación emitida en este código, sin embargo se aclara que el documento de referencia es API 576.



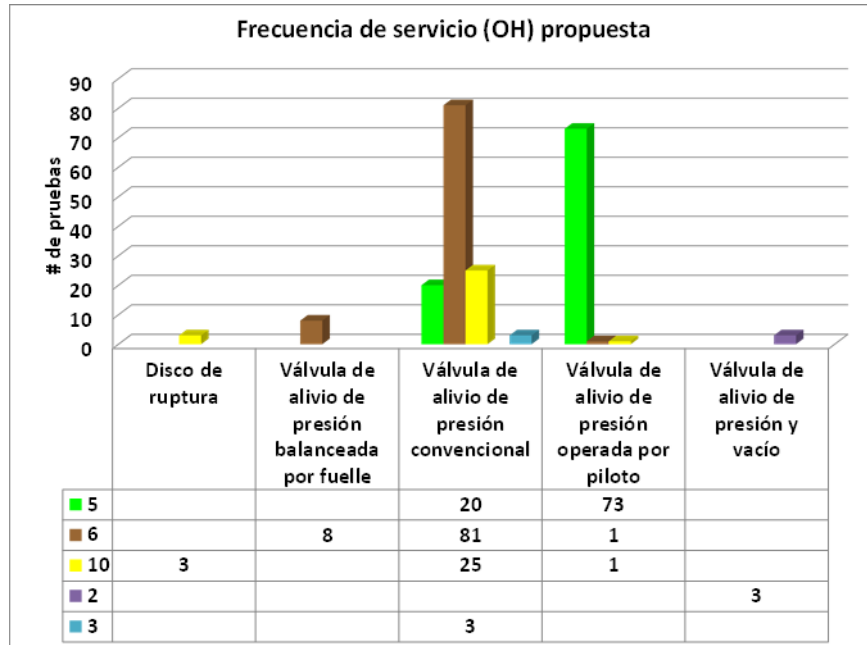
Ítem	Descripción	Fuente
	<p>* El intervalo de inspección visual en servicio para todos los PRD's será 5 años, excepto para las válvulas de alivio de presión y vacío y discos / pines de ruptura cuyo intervalo será 1 año.</p> <p>* Para todos los PRD's en facilidades o proyectos nuevos donde los efectos de la corrosión, taponamiento por el fluido, o la habilidad de operar bajo las condiciones de servicio dadas son desconocidas, se establecerá un intervalo de inspección más corto que incluirá prueba de desempeño e inspección visual. Dicho intervalo no deberá exceder el menor entre la primera parada planeada de la unidad o dos (2) años de servicio.</p> <p>Para servicios utilitarios, el intervalo inicial no deberá exceder la primera parada planeada de la unidad o tres (3) años de servicio.</p> <p>De común acuerdo con el departamento de ingeniería e integridad de Equión, se podrán aplicar los criterios establecidos arriba a PRD's de proyectos nuevos, siempre que se puedan asociar a dispositivos en operación bien sea por severidad del fluido, tipo de dispositivo, fabricante y modelo o procesos similares en esa facilidad.</p> <p>* Para todos los intervalos, si los resultados de las pruebas no son satisfactorios, se deberá calcular la probabilidad de falla para un nivel de confiabilidad no menor al 80% y redefinir la frecuencia de intervención.</p>	

Los planes de inspección específicos para cada dispositivo se muestran en el anexo A, e incluyen la siguiente información:

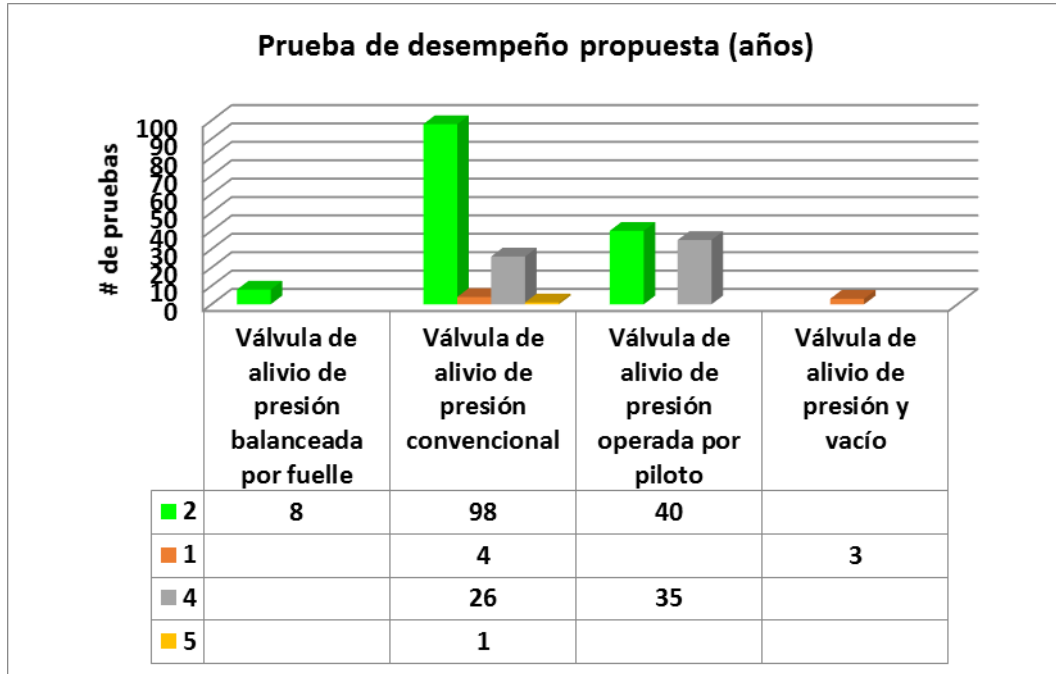
- Ubicación
- Sistema
- TAG
- Tipo de dispositivo
- Set de presión
- Tolerancias de ajuste del set de presión y prueba de hermeticidad
- Intervalo de prueba de desempeño
- Intervalo de servicio
- Intervalo de inspección visual en servicio
- Requerimientos adicionales de inspección
- Fecha máxima para la ejecución del plan

Las figuras 28 a 30 muestran los intervalos de inspección (en años) bajo la estrategia de mantenimiento propuesta.

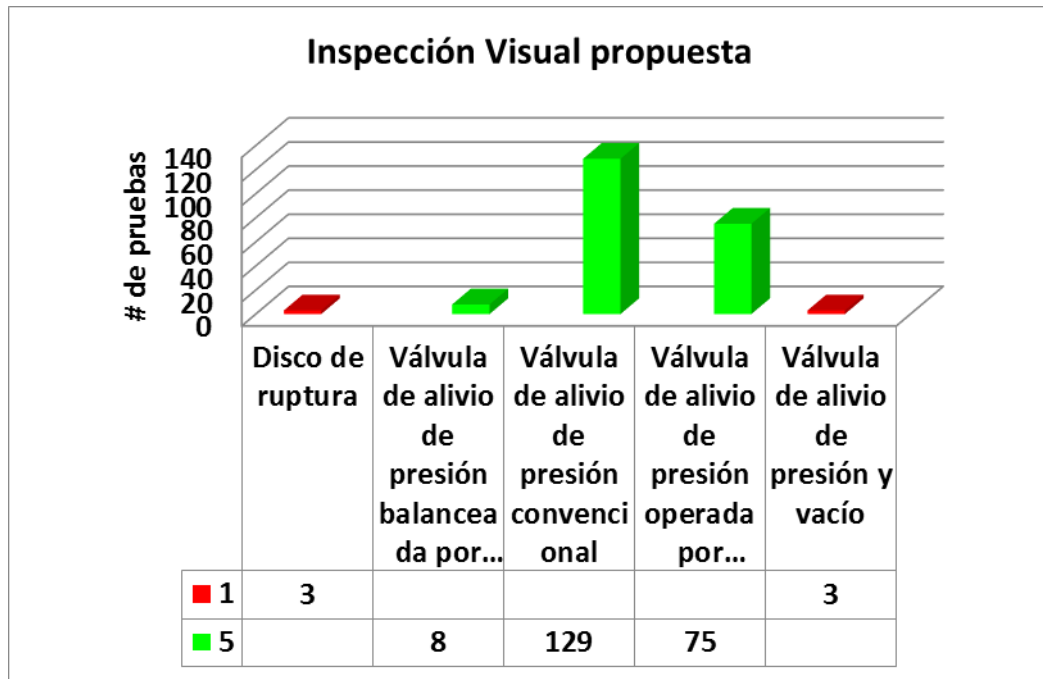
**Figura 27 Intervalo de servicio (desensamblaje e inspección interna)**



**Figura 28 Intervalo de pruebas de desempeño**



**Figura 29 Intervalo de inspección visual en servicio**



**5.1.1 Parámetro de vida media** A continuación se relacionan los tiempos de vida promedio característicos por cada fabricante de acuerdo a los resultados del modelo de riesgo.

**Figura 30 Tiempo promedio de vida**

FABRICANTE	MODELO	TIPO	TIEMPO PROMEDIO DE VIDA $\eta_{upd}$ / MTBF (AÑOS)
CONSOLIDATED	19096 SRV	Válvula de alivio de presión convencional	7,22
CONSOLIDATED	1910 SRV	Válvula de alivio de presión convencional	7,57
CONSOLIDATED	1910 SRV	Válvula de alivio de presión balanceada por fuelle	15,44
CONSOLIDATED	3900 POSRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	7,03
CROSBY	243 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	5,94
CROSBY	253 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	6,85
CROSBY	263 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	7,06
CROSBY	443 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	5,82
CROSBY	453 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	3,24
CROSBY	463 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	3,15
CROSBY	81 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	10,34
CROSBY	83 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	10,57
CROSBY	86 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	5,07
CROSBY	93 POSRV	Válvula de alivio de presión y vacío operada por piloto	13,20
CROSBY	900 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	8,59
CROSBY	JOS PRV	Válvula de alivio de presión convencional	11,82
FARRIS	2600 PRV	Válvula de alivio de presión balanceada por fuelle	10,95
FARRIS	2600 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	9,97
FARRIS	2850 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	11,67
FARRIS	2700 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	6,22
FARRIS	3800 POPRV	Válvula de alivio de presión operada por piloto	4,71
KINGSTON	120 SRV	Válvula de alivio de presión convencional	17,34
MERCER	8100 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	11,76
MERCER	9100 PRV	Válvula de alivio de presión convencional	11,59
PROTECTOSEAL	8540 PVRV	Válvula de alivio de presión y vacío	19,19
TAYLOR	8200 SRV	Válvula de alivio de presión convencional	10,33

## 6. CONCLUSIONES

Se elaboró un modelo de riesgo y confiabilidad para los dispositivos de alivio de presión del CPF de Floreña. Una vez sensibilizado el modelo y validados sus resultados se obtuvo la siguiente clasificación de riesgo para los 218 dispositivos evaluados:

44 dispositivos se encuentran en riesgo medio-alto, 138 en riesgo medio y 36 en riesgo bajo.

No hay ningún dispositivo cuyo riesgo sea no tolerable para Equión (riesgo alto) de acuerdo a la matriz de valoración definida para este análisis. (ver anexo 1)

El 80% del riesgo se encuentra representado por el 20% de los dispositivos, los cuales se encuentran en la categorías medio-alto y bajo. Con base en esta conclusión, se generó una estrategia de mantenimiento optimizada para los equipos de riesgo medio-alto.

El manejador principal de la probabilidad para la clasificación de los PRD's en las categorías de riesgo medio y medio-alto, fue la baja efectividad de la inspección. Este es uno de los factores que permite estimar con precisión las tasas de falla de cada dispositivo y establecer su desempeño real en demanda. La nueva estrategia incluye dentro de sus actividades que permitirán incrementar la efectividad de las intervenciones, de manera que se pueda mejorar la estimación de la probabilidad de falla para futuros análisis de riesgo.

Se generaron los planes de inspección específicos para cada PRD con base en el nivel de riesgo actual y el análisis de su desempeño según los registros históricos.

De esta forma se redefinieron los intervalos de inspección y se modificó la estrategia de mantenimiento actual para priorizar los recursos en aquellos dispositivos que se definieron como de mayor riesgo. (ver anexo 2)

La ventaja de la implementación de la estrategia de mantenimiento propuesta versus la actual, es que permitirá una optimización en la gestión del riesgo a través de la inspección, disminuyendo actividades que no generan valor ni contribuyen en la confiabilidad de la planta y focalizando los esfuerzos del grupo de mantenimiento únicamente en los dispositivos que pueden generar riesgo para la operación. No se demostró en términos de costo – beneficio ya que la empresa maneja estos valores confidencialmente.

Adicionalmente se alcanzará el logro de los objetivos propuestos para la superintendencia de mantenimiento e integridad en torno a la ejecución presupuestal y se dará el primer paso para la implementación de los indicadores de clase mundial que se esperan implementar en el corto plazo.

Se determinó el tiempo medio de vida característico para cada fabricante y modelo de válvulas, con el fin de utilizarlo como dato de entrada para futuros análisis de confiabilidad, o como valor estándar para el modelo de riesgo, en lugar de los valores genéricos establecidos por API 581. Esto permitirá calcular con una mayor certeza la probabilidad de falla de un PRD y estimar el riesgo acorde a las condiciones actuales de la planta. (Ver anexo 3)

El modelo de confiabilidad, permitió analizar las tasas de falla y definir el intervalo óptimo de intervención para aquellos dispositivos que cuentan con más de 3 eventos registrados. Para estos dispositivos se determinó la curva de confiabilidad, se estableció el tiempo medio entre fallas con base en el modelo de distribución acumulada de Weibull y el tipo de mantenimiento a realizar con base en el valor de  $\beta$  obtenido. (Ver anexo 4)

La concepción actual de la estrategia de mantenimiento no integra completamente los requerimientos de inspección mostrados arriba en la tabla 7, por esta razón no se pudo alcanzar un alto nivel de confianza en la inspección para predecir el comportamiento en servicio de los PRD's con el menor nivel de incertidumbre posible. Finalmente esta situación no permitió darle el suficiente crédito a aquellos PRD's que son frecuentemente probados en banco o desensamblados y cuyos resultados han sido satisfactorios, en aras de extender al máximo su intervalo de prueba.

Se recomienda que la nueva estrategia incluya pero no se limite a la verificación del estado interno de las tuberías U/S y D/S de los PRD's cuando se desmontan, para descartar o confirmar taponamiento, ensuciamiento o corrosión que puedan afectar la apertura en demanda, ejecutar pruebas de desempeño a las válvulas de alivio de presión y vacío periódicamente, incluir rutinas de inspección para los discos y pines de ruptura y asegurar un sistema de manejo documental que permita mantener los registros de inspección centralizados y retroalimentar el modelo de riesgo continuamente.

## BIBLIOGRAFÍA

AL-FAWZAN, Mohammad A. Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution. Saudi Arabia. Mayo, 2010. [online]. [citado en enero, 2016]. Disponible

en<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.583.5465&rep=rep1&type=pdf>>

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Inspection of Pressure-relieving Devices. API 576: 2009. 3ed. NW, Washington: API, 2009. 78p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Piping Inspection Code. API 570: 2016. 4ed. NW, Washington: API, 2016. 23-53p

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Pressure Vessel Inspection Code In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration. API 510: 2014. 10ed. NW, Washington: API, 2014. 18-37p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Pressure-relieving and Depressuring Systems. API 521: 2014. 6ed. NW, Washington: API, 2014. 161p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection Technology. API 581: 2016. 3ed. NW, Washington: API, 2016. 1-77p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk-Based Inspection. API 580: 2016. 3ed. NW, Washington: API, 2016. 94p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Seat Tightness of Pressure Relief Valves. API 527: 1991. 3ed. NW, Washington: API, 2002. 12p

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. API 652: 2013. 4ed. NW, Washington: API, 2013. 39-46p.

BORRAS PINILLA, Carlos. Principios de mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.

DRESSER. Consolidated Safety Relief Valve Complete Catalogue. Houston, Texas, 2008. 498p.

FARRIS ENGINEERING. Products Catalogue. Curtiss-Wright Flow Control Corporation. USA, 2012. 8p.

HENRY, P.E., MAGYARI, V.L., BAHAM, D. Risk Based Method to Establish Inspection Intervals for Pressure Relief Device. En: Inspectioneering Journal. Junio, 2010. Vol. 16, Issue no. 3, p. 12-21.

Mora, Alberto. Mantenimiento, planeación, ejecución y control. 1 ed. México, Septiembre, 2009. P. 50 – 130

NATIONAL BOARD OF BOILER AND PRESSURE VESSEL INSPECTORS. National Board Inspection Code. 2011 NBIC: Part 2: Inspection. Ed. 2011. Columbus, Ohio: The National Board, 2011. 13-56p.

RACEDO MATERON, Manuel Francisco. VELASQUEZ OSPINA, Jonathan. Plan de mantenimiento basado en un estudio de confiabilidad para las válvulas de seguridad de las plantas de polietileno I y II de la refinera Barrancabermeja Ecopetrol S.A. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad Industrial de

Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010. 82p.

TYCO FLOW CONTROL, INC. Crosby products catalogue. USA, 2009. 24p.

## ANEXOS