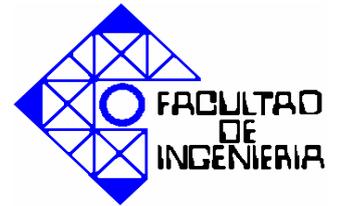




**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“ESTUDIO DE FALLA PARA UN DISCO DE RUPTURA INSTALADO
EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE UNA PLANTA REFINADORA DE
CRUDO”**

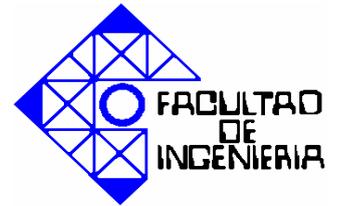
**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR:
BR. LUISANA MUÑOZ MORALES**

BÁRBULA, SEPTIEMBRE DE 2007



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“ESTUDIO DE FALLA PARA UN DISCO DE RUPTURA INSTALADO
EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE UNA PLANTA REFINADORA DE
CRUDO”**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

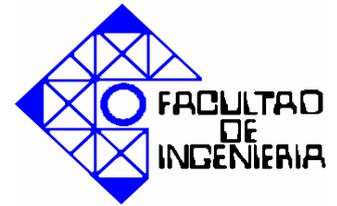
**TUTOR ACADÉMICO:
ING. LUIS VALLÉS**

**TUTOR INDUSTRIAL:
ING. FRANKLIN ACEVEDO**

BÁRBULA, SEPTIEMBRE DE 2007



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO



SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TÍTULO DEL TRABAJO:

“ESTUDIO DE FALLA PARA UN DISCO DE RUPTURA INSTALADO EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE UNA PLANTA REFINADORA DE CRUDO”

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: Semestre 2^{do}/ 2006

FECHA DE EX. FINAL: Semestre 2^{do}/ 2007

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA: 30/10/ 2007

SINOPSIS:

El objetivo fundamental de este proyecto es estudiar la falla operativa que genera la ruptura prematura del disco de seguridad instalado en un sistema de alivio de una planta refinadora de crudo, originando condiciones de operación inseguras y aumento de los costos por mantenimiento debido a la frecuencia con la que ocurre el evento.

Para ello, fue necesaria la evaluación de las condiciones bajo las cuales se realiza el proceso de alivio de gases en la planta en sus variables fundamentales y sus efectos sobre la actuación de los discos de ruptura. Asimismo, se estudiaron las condiciones de utilización de los discos en lo que se refiere al cumplimiento de los parámetros de operación especificados por la compañía diseñadora del sistema de alivio, la instalación en la tubería y el almacenaje. Todos los aspectos investigados fueron evaluados aplicando diversos métodos que incluyen desde la aplicación de teorías aprendidas a lo largo de la carrera de Ingeniería Mecánica en sus diferentes ramas (evaluación hidráulica del sistema de alivio, cálculo de cargas, estudio de materiales) hasta la utilización de modernos softwares para la determinación de las propiedades del fluido que circula a través del sistema y de los esfuerzos generados por las cargas a las cuales se encuentra sometido el disco de ruptura en operación. Se concluyó que la falla por ruptura prematura en los discos se debe a un retroceso de llama desde los quemadores del mechurrio originado por un pase en las válvulas de control de flujo, así como a la instalación de discos con daños previos. El diagnóstico fue validado mediante la aplicación de la herramienta de confiabilidad denominada Análisis Causa Raíz, que a su vez permitió la propuesta de una estrategia de solución apropiada, destinada a la corrección de las irregularidades identificadas. Se recomendó llevar a cabo una serie de medidas con el fin de mejorar fundamentalmente las actividades relacionadas a la adquisición y manipulación de los discos de ruptura y el control del proceso de alivio de gases.

CÉDULA DE IDENTIDAD

ESTUDIANTE

FIRMA

17 903 739

Br. Luisana Muñoz M.

FIRMA

PROFESOR GUÍA: Dr. Luis Vallés



A mis padres, Pedro José y Rosángela, por su inmenso amor, dedicación, apoyo, empeño y entrega para que culminara mi formación en la profesión que elegí. No existen palabras para expresarles mi amor y agradecimiento; a ustedes les debo todo lo que soy y seré, son mi ejemplo a seguir. Los amo profundamente y quiero tenerlos a los dos juntos por siempre. Gracias por confiar en mi.

A mis hermanos Jesús Enrique y Pedro José, quienes actualmente cursan el noveno y tercer semestre de la hermosa carrera de Ingeniería Mecánica, para que no se rindan nunca ante las dificultades que se les presenten.

A toda mi familia, porque han sido incondicionales conmigo, dándome su amor y buenos consejos, han celebrado mis triunfos y alegrías y han estado allí para reconfortarme en los momentos de tristeza.

A mis amigos Abraham, Serge, Laura, José Antonio, Paola y Nathalia, por haber compartido con ustedes más que la carrera, los sueños. Con ustedes he aprendido el significado de la sincera amistad. Espero tenerlos en mi vida por muchos años más.



Al Sr. Juan Casal, por haberme permitido la realización de este proyecto especial de grado en una empresa que considero ideal para el desarrollo de un profesional de la Ingeniería Mecánica. Igualmente a su señora Lesbia de Casal y familia por su trato especial hacia mi persona.

A mi tutor académico Dr. Luis Vallés por sus oportunas observaciones y recomendaciones. A mi tutor industrial Ingeniero Franklin Acevedo, por su tiempo para mí, así como por sus recomendaciones en los momentos difíciles.

A mis compañeros Ingeniero Mariana Mayora e Ingeniero Freddy Lanza por su amistad. Valoro profundamente sus consejos y toda la colaboración que me prestaron durante mi estadía en la empresa como tesista.

A todos los muchachos y muchachas del Departamento de Ingeniería de Instalaciones, por su trato especial, su colaboración y por haberme hecho sentir una más de ustedes.

Al personal de los departamentos de Operaciones, Automatización, Instrumentación y Tecnología, Inspección y Corrosión y al Ingeniero Luis Daniel González del Departamento de Procesos por su ayuda y buena disposición a colaborar en la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas dentro y fuera de la empresa que de una u otra manera me dieron su apoyo.

A todos ellos mil gracias.



- ❖ **A:** Área de sección transversal de la tubería.
- ❖ **A_d:** Superficie del disco enfrentada a la presión del proceso.
- ❖ **A₀:** Área del disco de ruptura.
- ❖ **C:** Coeficiente perteneciente a la expresión mediante la cual se calcula el área del disco de ruptura (A₀).
- ❖ **C_p:** Calor específico de una sustancia a presión constante.
- ❖ **C_v:** Calor específico de una sustancia a volumen constante.
- ❖ **d:** Diámetro interno de la tubería.
- ❖ **D:** Diámetro nominal de la tubería.
- ❖ **f:** Factor de fricción.
- ❖ **F:** Fuerza.
- ❖ **ft – lb:** Pie por libras (unidad de torque).
- ❖ **FCC:** Posee dos referencias: Craqueo Catalítico Fluidizado (unidad que alivia en el mechorrio B – 7351/ B – 7352); Face Centre Cubic (estructura del acero Cúbica Centrada en las Caras).
- ❖ **g:** Aceleración de la gravedad.
- ❖ **GPa:** Gigapascal.
- ❖ **hf:** Pérdidas totales por fricción en tuberías y accesorios.
- ❖ **H:** Disponibilidad.
- ❖ **K:** Razón de calores específicos a volumen constante.
- ❖ **Kb:** Factor de corrección que reduce la capacidad de descarga debido a incrementos de la contrapresión.
- ❖ **kN:** Kilonewton.
- ❖ **kPa:** Kilopascal.
- ❖ **LBH:** Libras por horas (unidad de flujo másico).
- ❖ **L_{eqaccesorios}:** Longitud equivalente de accesorios.
- ❖ **L_{tramo}:** Longitud del tramo.
- ❖ **m:** Metro.
- ❖ **m. c. g.:** Metro de columna de gas.



- ❖ **mm:** Milímetro.
- ❖ **M:** Masa molecular.
- ❖ **MPa:** Megapascal.
- ❖ **P:** Presión.
- ❖ **Pa:** Presión absoluta en el interior del recipiente.
- ❖ **Pb:** Presión absoluta en el exterior o contrapresión.
- ❖ **P_{crít}:** Presión crítica.
- ❖ **P_{mínEst}:** Presión mínima de estallido calculada para un disco de ruptura.
- ❖ **P_{máxTrab}:** Presión máxima de operación de la línea en la que se encuentra instalado un disco de ruptura.
- ❖ **pulg (‘’):** Pulgada.
- ❖ **q_m:** Flujo máximo a descargar o capacidad de descarga requerida del disco de ruptura.
- ❖ **Q:** Caudal.
- ❖ **Re:** Número de Reynolds.
- ❖ **s:** Segundo.
- ❖ **T:** Temperatura.
- ❖ **v:** Volumen específico a la presión y temperatura de alivio.
- ❖ **V:** Velocidad del fluido en la tubería.

- ❖ **Z:** Posee dos referencias: Factor de compresibilidad de los gases (factor que compensa la falta de idealidad de un gas); altura del punto en estudio respecto a la referencia (cota de un determinado punto del arreglo de tuberías en estudio respecto al punto de referencia).

- ❖ **α:** Coeficiente de descarga según el tipo de boquilla.
- ❖ **γ:** Peso específico.

- ❖ **μ:** Viscosidad dinámica.
- ❖ **ρ:** Densidad del fluido.
- ❖ **σ:** Esfuerzo.



- ❖ Ø: Diámetro.
- ❖ °C: Grados Centígrados.
- ❖ °F: Grados Fahrenheit.



ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice general de variables	v
Índice de contenido	viii
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xviii
Índice de gráficos	xxii
Introducción	xxiii
Capítulo I: El Problema	
1. Planteamiento del problema	3
1.1 Descripción	3
1.2 Formulación	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Justificación	11
1.5 Delimitación	12
1.6 Limitaciones	12
Capítulo II: Marco Teórico	
2.1 Antecedentes de la investigación	13
2.2 Bases teóricas	15



2.2.1	Conceptos y parámetros sobre discos de ruptura	15
2.2.2	Condiciones de utilización de los discos de ruptura	16
2.2.3	Ventajas y desventajas de los discos de ruptura	16
2.2.4	Tipos de discos de ruptura	17
2.2.5	Selección del tipo de disco de ruptura	22
2.2.6	Dimensionado de discos de ruptura	23
2.2.7	Fallas en discos de ruptura	29
2.2.8	Causas de falla por ruptura prematura	30
2.2.9	Características generales del sistema de alivio en el que se encuentra instalado el disco de ruptura	30
2.2.10	Aceros inoxidable	31
2.2.11	Aceros inoxidable austeníticos	32
2.2.12	Cargas en discos de ruptura	33
2.2.13	Esfuerzos uniformemente distribuidos	34
2.2.14	Análisis Causa Raíz (ACR)	34
2.2.15	Procedimiento para realizar un ACR	35

Capítulo III: Marco Metodológico

3.1	Nivel de la investigación	39
3.2	Diseño de la investigación	40

Capítulo IV: Desarrollo del Trabajo

4.1	Preparando el Análisis Causa Raíz	50
4.2	Estudio de las instalaciones del Mechurrio B – 7351/ B - 7352	56
4.2.1	Consideraciones de John Zink Company para el diseño del	56



mechurrio B – 7351/ B - 7352	
4.2.2 Condiciones actuales de las instalaciones del mechurrio B – 7351/ B - 7352	60
4.3 Estudio de las condiciones de utilización de los discos de ruptura en el Mechurrio B – 7351/ B - 7352	63
4.3.1 Caracterización de los discos de ruptura que deben ser utilizados para las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B - 7352	63
4.3.2 Características de los discos de ruptura encontrados en el almacén	66
4.3.3 Características de los discos de ruptura instalados en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B - 7352	67
4.3.4 Especificaciones técnicas de las órdenes de compra de los discos de ruptura	69
4.3.5 Especificaciones del fabricante BS&B Safety Systems para la instalación de los discos de ruptura	71
4.3.6 Condiciones de instalación de los discos en las tuberías correspondientes a las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B - 7352	77
4.3.7 Instrucciones de los fabricantes de discos de ruptura para su almacenaje	81
4.3.8 Condiciones de almacenaje y características de los discos de ruptura que se instalan en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B - 7352	81
4.4 Estudio de las condiciones operativas actuales del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	83
4.4.1 Consideraciones para el estudio de las condiciones operacionales del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	83
4.4.2 Consideraciones para realizar la evaluación hidráulica del	89



sistema de alivio B – 7351/ B – 7352	
4.4.3 Consideraciones sobre la operación de los equipos que conforman el sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	96
4.5 Cálculo de caudal, velocidad y presión de los gases en los puntos en que se encuentran instalados los discos de ruptura del mechorrio B – 7351/ B - 7352	96
4.6 Cálculo de las cargas producidas por la presión sobre los discos de ruptura	121
4.7 Determinación del esfuerzo sobre los discos de ruptura en Visual Nastran	124
4.8 Estudio de las condiciones de las válvulas FV – 801 y FV – 901 correspondientes a las etapas 8 y 9 del mechorrio B – 7351/ B - 7352	133
4.9 Análisis del material de los discos de ruptura	136
4.10 Verificación de las hipótesis del Árbol Lógico de Fallas	140
4.11 Diagnóstico de falla	149
4.12 Propuesta de solución	149
Capítulo V: Análisis de Resultados	
5.1 Preparando el Análisis Causa Raíz	152
5.2 Estudio de las instalaciones del Mechorrio B – 7351/ B - 7352	153
5.3 Estudio de las condiciones de utilización de los discos de ruptura en el Mechorrio B – 7351/ B - 7352	153
5.4 Estudio de las condiciones operativas actuales del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	156
5.5 Cálculo de caudal, velocidad y presión de los gases en los puntos en que se encuentran instalados los discos de ruptura del mechorrio B – 7351/ B - 7352	159



5.6 Cálculo de las cargas producidas por la presión sobre los discos de ruptura	160
5.7 Determinación del esfuerzo sobre los discos de ruptura en Visual Nastran	160
5.8 Estudio de las condiciones de las válvulas FV – 801 y FV – 901 correspondientes a las etapas 8 y 9 del mecurrío B – 7351/ B - 7352	161
5.9 Análisis del material de los discos de ruptura	161
5.10 Verificación de las hipótesis del Árbol lógico de Fallas	162

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Glosario de términos

Anexos

Anexo A: Planos dimensionales de los discos de ruptura y certificados de calidad y conformidad emitidos por la compañía fabricante.

Anexo B: Catálogo de características de los discos de ruptura.

Anexo C: Hoja técnica de especificaciones de los discos de ruptura.

Anexo D: Instrucciones de instalación según compañía fabricante.

Anexo E: Especificaciones de discos en órdenes de compra e inventario.

Anexo F: Recomendaciones para almacenamiento de los discos.

Anexo G: Clasificación de las válvulas según la hermeticidad (normas ANSI/FCI 70 – 2 e IEC 60534 – 4).



ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I: El Problema

Figura I.1: Esquema de sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	4
Figura I.2: Funcionamiento del tambor de sello de agua	6

Capítulo II: Marco Teórico

Figura II.1: Disco de ruptura	15
Figura II.2: Disco de ruptura abovedado convencional	18
Figura II.3: Tipos de discos de ruptura abovedados convencionales	18
Figura II.4: Soporte para discos de ruptura	19
Figura II.5: Disco de ruptura abovedado invertido	19
Figura II.6: Disco de ruptura abovedado invertido con hojas de cuchilla	20
Figura II.7: Disco de ruptura plano	21
Figura II.8: Disco de ruptura monobloque	22
Figura II.9: Factor de compresibilidad Z en función de la temperatura y presión reducidas	28
Figura II.10: Árbol Lógico de Falla	37

Capítulo III: Marco Metodológico

Figura III.1: Puntos genéricos para aplicar Balance de Energía	45
Figura III.2: Puntos genéricos para aplicar Balance de Masa	46



Capítulo IV: Desarrollo del Trabajo

Figura IV.1: Análisis cuantitativo de la situación problemática	50
Figura IV.2: Evidencia de exposición de discos de ruptura al fuego	52
Figura IV.3: Línea de tiempo Sistema de Alivio de B – 7351/ B - 7352	53
Figura IV.4: Árbol Lógico de Falla mechurrio B – 7351/ B - 7352	55
Figura IV.5: Instalaciones actuales del mechurrio B – 7351/ B - 7352	61
Figura IV.6: Diseño del mechurrio B – 7351/ B – 7352 propuesto por JZ Company	61
Figura IV.7: Disco tipo D con asiento angular, formado por una sección de metal y sello plástico o metálico	64
Figura IV.8: Disco tipo D con anillo protector unido al lado de baja presión (DR)	65
Figura IV.9: Disco tipo D con soporte de vacío	65
Figura IV.10: Tag de identificación de los discos en existencia en el almacén	67
Figura IV.11: Tag de identificación del disco de ruptura instalado en la etapa 8	68
Figura IV.12: Lugar en el que se encuentran instalados los discos de ruptura	69
Figura IV.13: Instalación del disco de ruptura en el soporte de seguridad	73
Figura IV.14: Instalación de la unidad disco – soporte en las bridas de la tubería	74
Figura IV.15: Valores de torque recomendados por BS&B Safety Systems para la instalación de discos de ruptura tipo D o B	76





Figura IV.16: Esquema de colocación incorrecta de discos de ruptura	78
Figura IV.17: Condición de un disco de ruptura antes de su instalación	80
Figura IV.18: Evidencia de corrosión en el borde del disco de ruptura	80
Figura IV.19: Condiciones de almacenamiento de los cuatro discos presentes en el Galpón N° 2 de Área Q	82
Figura IV.20: Corrosión en la superficie de los discos y bordes en mal estado	82
Figura IV.21: Consecuencias del almacenaje indebido de los discos	83
Figura IV.22: Puntos considerados para la medición de las variables fundamentales del proceso de alivio de gases	85
Figura IV.23: Diagrama de valores de presión a la entrada del tambor separador D - 7351	87
Figura IV.24: Diagrama de valores de temperatura a la entrada del tambor separador D - 7351	87
Figura IV.25: Diagrama de valores de presión en el manifold de 24" del B - 7351	88
Figura IV.26: Diagrama de valores de temperatura en el manifold de 24" del B - 7351	88
Figura IV.27: Diagrama de valores de presión en el manifold de 36" del B - 7352	89
Figura IV.28: Introducción de los datos de la corriente en el software de simulación de procesos PRO II	91
Figura IV.29: Selección de los métodos de cálculo en el software de simulación de procesos PRO II	92
Figura IV.30: Resultados de la simulación en PRO II para determinar las propiedades de la mezcla de gases	93



Figura IV.31: Proporción en las fases de la mezcla de gases de alivio del mechorrio B – 7351 / B - 7352	94
Figura IV.32: Puntos considerados para la evaluación hidráulica de la red	97
Figura IV.33: Certificado de características del disco de ruptura de 24” emitido por el fabricante	122
Figura IV.34: Simulación de las condiciones de instalación de los discos de ruptura	125
Figura IV.35: Cargas sobre discos de ruptura del Mechorrio B - 7352	126
Figura IV.36: Superficie del disco sobre la cual actúa la carga debida a la presión de los gases del lado del proceso.	127
Figura IV.37: Simulación de las condiciones de carga de los discos de ruptura en operación.	128
Figura IV.38: Esfuerzo Máximo Vs N° de Nodos disco 24”	131
Figura IV.39: Esfuerzo Máximo Vs N° de Nodos disco 30”	131
Figura IV.40: Esfuerzos debidos a las cargas de presión en disco de ruptura de 24 pulgadas.	132
Figura IV.41: Esfuerzos debidos a las cargas de presión en disco de ruptura de 30 pulgadas.	133
Figura IV.42: Condiciones de las tuberías en las que se encuentran instaladas las válvulas FV – 801 y FV 901	134
Figura IV.43: Restos de óxido en el piso, luego de retirar las válvulas	135
Figura IV.44: Condiciones del asiento y el actuador de las válvulas FV – 801 y FV – 901	134
Figura IV.45: Acumulación de partículas entre el asiento y el actuador de las válvulas.	136
Figura IV.46: Microestructura: 1000x. Muestras de discos estudiados.	138



Figura IV.47: Curvas de sensibilización Tiempo – Temperatura para los Aceros Inoxidables.	139
Figura IV.48: Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 1	140
Figura IV.49: Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 2	141
Figura IV.50: Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 3	142
Figura IV.51: Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 3 (continuación)	143
Figura IV.52: Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 4	144
Figura IV.53: Árbol Lógico de Fallas luego de la primera verificación de hipótesis	145
Figura IV.54: Matriz de verificación de hipótesis	147
Figura IV.55: Árbol Lógico Falla final	148



ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I: El Problema

Tabla I.1: Condiciones de diseño/ operación de los equipos del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	7
---	---

Capítulo II: Marco Teórico

Tabla II.1: Valores de c según coeficiente isoentrópico K	25
Tabla II.2: Factor de corrección Kb de la capacidad de descarga de la contrapresión	26
Tabla II.3: Coeficientes de descarga α según tipo de boquilla	28

Capítulo IV: Desarrollo del Trabajo

Tabla IV.1: Presiones de apertura y cierre de las etapas del mechurrio B – 7351/ B – 7352, según diseño propuesto para modificación y expansión	58
Tabla IV.2: Presiones de apertura y cierre de las etapas del mechurrio B – 7351/ B – 7352, en el diseño instalado en sitio	62
Tabla IV.3: Características de los discos de ruptura especificadas por JZ Company	63
Tabla IV.4: Características de los discos de ruptura de 24” destinados al reemplazo en el B - 7352	66
Tabla IV.5: Características del disco de 24” instalado en la etapa 8 del B - 7352	68



Tabla IV.6: Especificaciones en SAP para compra de disco de ruptura de 24"	70
Tabla IV.7: Especificaciones en SAP para compra de disco de ruptura de 24"	70
Tabla IV.8: Especificaciones en SAP de los discos de ruptura presentes en el almacén	71
Tabla IV.9: Valores de presión y temperatura en el cabezal de 42" indicados por los instrumentos a la entrada del tambor separador D - 7351	85
Tabla IV.10: Valores de presión y temperatura indicados por los instrumentos en el manifold de 24" del B - 7351 y en la consola del área de Servicios Industriales	86
Tabla IV.11: Valores de presión indicados por el medidor instalado en el manifold de 36" del B - 7352	86
Tabla IV.12: Componentes de la mezcla de gases	90
Tabla IV.13: Condiciones de la mezcla de gases a la entrada del tambor separador D - 7351	92
Tabla IV.14: Propiedades de la mezcla de gases	94
Tabla IV.15: Propiedades de la fase vapor	95
Tabla IV.16: Propiedades de la fase líquido	95
Tabla IV.17: Características de los tramos de tuberías considerados para la evaluación de caudales y velocidades	98
Tabla IV.18: Área de la sección de los tramos de tubería estudiados	98
Tabla IV.19: Accesorios de los tramos de tuberías considerados para la evaluación de caudales y velocidades	99
Tabla IV.20: Cotas de los puntos considerados para la evaluación de caudales y velocidades	100



Tabla IV.21: Disponibilidad en los puntos dato, para el estudio del sistema en cada medición realizada	101
Tabla IV.22: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 2 – 3 y 3 – 5 ($\varnothing 42''$) del mechurrio B – 7351/ 52	102
Tabla IV.23: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 3 – 4 ($\varnothing 36''$) del mechurrio B – 7351/ 52	103
Tabla IV.24: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 1 - 2 ($\varnothing 24''$) del mechurrio B – 7351/ 52	104
Tabla IV.25: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 4 – 0' ($\varnothing 30''$) del mechurrio B – 7351/ 52	105
Tabla IV.26: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 4 – 0'' ($\varnothing 24''$) del mechurrio B – 7351/ 52	106
Tabla IV.27: Caudal total del arreglo y disponibilidad del punto N° 3	113
Tabla IV.28: Valores de caudal en los tramos 32 y 34	114
Tabla IV.29: Valores de disponibilidad y caudales en los tramos de 30 y 24 pulgadas del mechurrio B - 7352	118
Tabla IV.30: Caudal que pasa a través de los arreglos en by – pass de 30 y 24 pulgadas en los que se encuentran instalados los discos de ruptura	119
Tabla IV.31: Valores de caudal y velocidad en los tramos de 30 y 24 pulgadas	120
Tabla IV.32: Valores de presión sobre los discos de ruptura en las tuberías de 30 y 24 pulgadas	121
Tabla IV.33: Valores del área de los discos utilizados para calcular la carga debida a la presión	123
Tabla IV.34: Carga sobre los discos debidas a la presión	123
Tabla IV.35: Propiedades del material de fabricación de los discos de	124



ruptura

Tabla IV.36: Carga crítica sobre los discos de ruptura utilizadas para la evaluación del esfuerzo 126

Tabla IV.37: Resultados de la determinación del esfuerzo en el disco de 24" a través de Elementos Finitos 129

Tabla IV.38: Resultados de la determinación del esfuerzo en el disco de 30" a través de Elementos Finitos 130

Tabla IV.39: Material y componentes de las muestras de discos de ruptura estudiados por el Departamento de Inspección y Corrosión de REP 137



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo IV: Desarrollo del Trabajo

Gráfico IV.1: Curvas de comportamiento de los tramos evaluados del Sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	109
Gráfico IV.2: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 32 del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352	111
Gráfico IV.3: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 34 del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352	111
Gráfico IV.4: Obtención del valor de H_3 a partir de la aplicación de las ecuaciones de Balance de Energía y Balance de Masa mediante método gráfico	112
Gráfico IV.5: Lectura de los caudales de los tramos 32 y 34 a partir del valor de H_3	113
Gráfico IV.6: Curva y ecuación que representa el comportamiento del tramo 4'0	115
Gráfico IV.7: Curva y ecuación que representa el comportamiento del tramo 4'0	116
Gráfico IV.8: Curvas de comportamiento de los arreglos en by – pass de 30 y 24 pulgadas en los que se encuentran instalados los discos en estudio	117
Gráfico IV.9: Determinación de caudales en los tramos de 30 y 24 pulgadas del mechurrio B - 7352	117



Un análisis de falla es un estudio exhaustivo y profundo destinado a la determinación de las causas que generan su advenimiento, con el fin de solucionar el o los problemas que se originan como consecuencia y aportar estrategias de mejoramiento que permitan realizar las operaciones industriales de manera más eficiente, segura y económica.

En una planta refinadora de crudo, la confiabilidad operacional es una estrategia que debe ser aplicada debido a la complejidad y precisión de los procesos que allí se efectúan, así como por el alto riesgo que éstos implican. Para lograr y mantener la protección de los equipos involucrados en dichos procesos, se han diseñado e instalado los sistemas de alivio. Un mechorrio, es un sistema de alivio que protege los equipos cuyas presiones de operación se vean excedidas durante una contingencia. Para ello, las instalaciones de los mechorrios cuentan con una serie de dispositivos de control y sistemas de seguridad que garantizan el buen funcionamiento de las unidades de la planta que alivian el flujo de gases en dichas instalaciones.

Un disco de ruptura o de seguridad, es uno de los dispositivos de seguridad que pueden instalarse en los sistemas de alivio. Su colocación en ellos, obedece a la necesidad de salvaguardar la operación de algún elemento de control, tal como en el caso de estudio, de las válvulas de control de flujo colocadas en las tuberías que llevan los gases de alivio hasta los quemadores del mechorrio B- 7351/ B- 7352 de la Refinería El Palito.

El proyecto que se detalla a continuación tiene como finalidad el estudio de la falla por ruptura prematura de los discos de seguridad instalados en el cabezal de 24 pulgadas de diámetro del mechorrio B – 7351/ B - 7352 de la Refinería El Palito. Para ello se llevará a cabo una investigación basada en la metodología del Análisis de Causa Raíz, la cual se apoyará en diversos recursos y herramientas de



la Ingeniería Mecánica para validar las hipótesis supuestas, como son el análisis de esfuerzos por elementos finitos y análisis de materiales.

Para dar inicio a la investigación, en primer lugar se han investigado todos los conceptos, parámetros y características referentes a discos de ruptura, tipos, materiales de fabricación, condiciones en las que pueden ser utilizados; también, ventajas y desventajas y cargas a las que se encuentran sometidos durante la operación del sistema. Igualmente, se describe el nivel de la investigación a realizar y la metodología empleada para tal fin. El desarrollo de la investigación se presenta en el Capítulo IV. Aquí se detallan todas las actividades ejecutadas durante las diferentes etapas descritas en la metodología, así como los cálculos realizados en las evaluaciones previstas y los resultados obtenidos, cuyo análisis se presenta en el Capítulo V. Finalmente, se encuentran las conclusiones emitidas sobre los resultados de la investigación y las recomendaciones realizadas para la corrección de las situaciones irregulares que originan la falla objeto de estudio de este trabajo especial de grado.



CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1 DESCRIPCIÓN.

La Refinería El Palito se encuentra ubicada en las costas del Estado Carabobo, inicia sus operaciones en junio del año 1960 con una capacidad de procesamiento de cincuenta y cinco mil barriles de crudo diarios, para lo cual contaba con una Unidad de Reformación Catalítica. Actualmente, procesa a diario un promedio de ciento treinta mil barriles de crudo para el suministro de combustible al centro occidente del país y a los clientes internacionales directos, entre los que se incluyen empresas procesadoras de energía eléctrica, regiones como la costa este y oeste de los Estados Unidos y el Caribe. La refinería entrega los productos requeridos por la Región Central del país a través de un sistema de poliductos y bombas que abarca más de doscientos Kilómetros. Los productos refinados en el complejo son almacenados, vendidos y despachados a través de las plantas de distribución El Palito, Yagua y Barquisimeto. El sistema de alivio en una refinería es un servicio necesario para garantizar la seguridad de las instalaciones, ya que es empleado para disponer en forma segura los gases que deben ser desalojados de las diferentes unidades de procesos que integran la planta, como consecuencia de contingencias operacionales. Un sistema de alivio debe garantizar que cuando se presenta una contingencia, todos los equipos cuyas presiones de operación se vean excedidas, sean capaces de desalojar los gases presentes en su interior.

En la Refinería El Palito existen en la actualidad cinco sistemas de alivio de los cuales tres se encuentran interconectados entre si y son utilizados para proteger la mayoría de las unidades de proceso de la planta.

El sistema de alivio B-7351/ B-7352, consta de un cabezal colector de 42 pulgadas de diámetro, un tambor separador horizontal, un sello de agua, un tanque



acumulador de agua para alimentar el sello y dos mechurrios tipo fosa conectados entre si y diseñados para quemar gases mediante su combustión completa. Este sistema recibe fundamentalmente los gases de alivio provenientes del complejo de Conversión y Tratamientos y de las áreas externas de almacenamiento y servicios. Las unidades o sistemas involucrados son: FCC (Craqueo Catalítico Fluidizado), Oxigenados, Vacío, Alquilación, Gas Combustible, Servicios Industriales, Merox y Aguas Agrias así como las esferas de Gas Licuado de Petróleo (LPG) y Butano (ver Figura I.1).

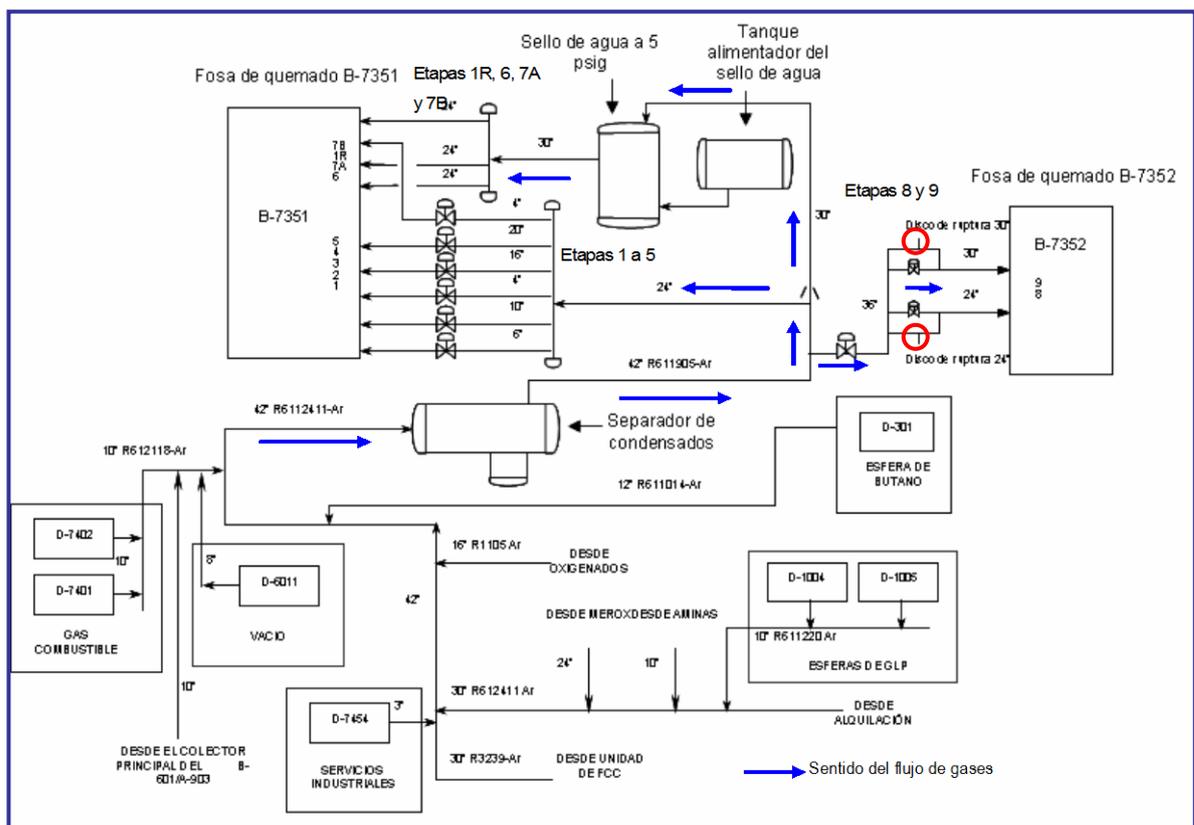


Figura I.1: Esquema de sistema de alivio B-7351/B-7352. Fuente PDVSA

La capacidad de quema del B-7351 es de 1 025 000 LBH, la cual se efectúa a través de siete etapas principales y dos secundarias considerando tres niveles de presión: 0,1; 2,7 y 5 psig. El mechurrio B-7352, es una extensión del B-7351, que se encuentra en funcionamiento desde el año 2003, con la finalidad de aumentar la



capacidad de quema en 750 000 LBH, mediante dos etapas más que operan en el rango de 9,9 a 10 psig.

El colector principal de 42 pulgadas de diámetro, después de los puntos de interconexión con los cabezales de alivio de las diferentes unidades asociadas a estos mechurrios, entra al tambor separador horizontal donde se produce la separación de los líquidos condensados asociados a los gases de alivio, para evitar el arrastre de combustibles líquidos hacia los cabezales de distribución de las nueve etapas de quemado y su combustión en los quemadores de los mechurrios. De lo contrario, se crean condiciones inseguras en el área y en el sistema, si se llegara a producir un retroceso del líquido inflamado desde las etapas de quemado hacia los cabezales principales de distribución. Igualmente, la combustión de líquidos en los quemadores nunca produciría una combustión completa por lo que el mechurrio generará humo, incumpliendo regulaciones ambientales.

Los líquidos combustibles almacenados en el tambor separador son desalojados mediante bombas que los envían a los tanques de slops y de allí a las unidades de crudo para su reprocesamiento o para emplearlo como corte en la preparación de residual.

El tambor separador también cuenta con un serpentín de calentamiento con vapor de 200 psig, empleado para vaporizar los hidrocarburos livianos aliviados hacia estos mechurrios, que no pueden ser enviados a los tanques de slops.

Los gases aliviados, después de separarle los posibles líquidos presentes, continúan su trayectoria por el cabezal de 42 pulgadas el cual se divide en tres subcabezales de 24, 30 y 36 pulgadas. El de 24 pulgadas está asociado a las primeras cinco etapas de quemado de la fosa B-7351, distribuyendo los vapores a los quemadores de las etapas manuales denominadas 1 y 1R (primera y primera redundante respectivamente) y a las etapas automáticas 2, 3, 4 y 5, que operan hasta una presión de 2,7 psig. El cabezal de 30 pulgadas de diámetro envía los vapores cuando la presión excede los 2,7 psig al tambor del sello de agua, desde el



cual pasan los gases a las etapas 6 y 7A y 7B. El tambor de sello hidráulico o de agua trabaja a una presión de 5 psig, evitando el paso de alivios con presiones menores a este valor a las etapas 6, 7A y 7B y garantizando regímenes adecuados de flujo en las etapas del cabezal primario, al hacer que la combustión en los quemadores sea completa. Este sistema es alimentado por gravedad con el agua almacenada en el tanque acumulador (ver Figura I.2).

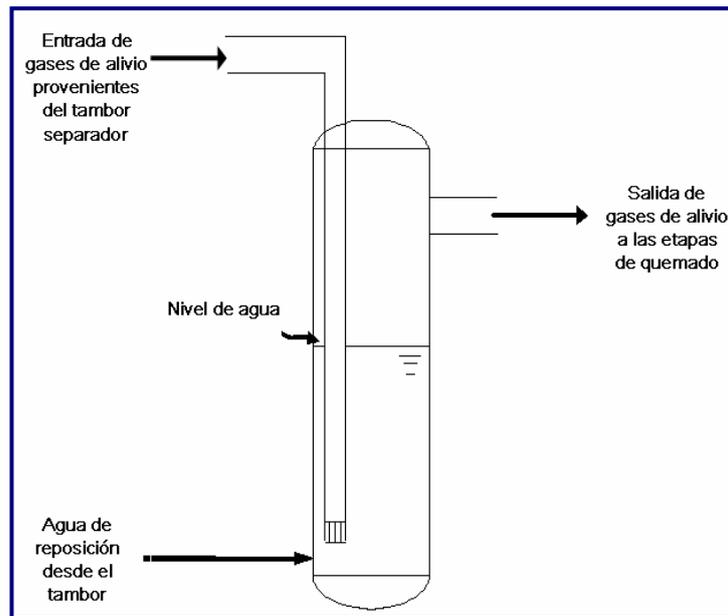


Figura I.2: Funcionamiento del tambor de sello de agua. Fuente PDVSA

El subcabezal de 36 pulgadas deriva del principal de 42 pulgadas, está ubicado después del dispositivo separador de condensados y se conecta a dos tuberías de 30 y 24 pulgadas que llevan los gases hacia la fosa B-7352, en la cual se encuentran las etapas 8 y 9 (automáticas) de este sistema de alivio (ver Figura I.1).

El cabezal principal de recolección de los gases posee un sistema de purga con gas combustible, con el fin de mantener una presión positiva mayor o igual a 8 pulgadas de agua y una temperatura menor o igual a 100 °F, impidiendo así la entrada de aire al sistema que generaría mezclas inflamables, representantes de un alto riesgo en caso de producirse retroceso de llamas desde las etapas de quemado



del mechurrio hacia los cabezales de distribución. Las características de los equipos que operan en el sistema de alivio se muestran en la Tabla I.1.

Tabla I.1: Condiciones de diseño/operación de los equipos del sistema de alivio B-7351/B-7352.

	Equipos		
	Tambor separador	Sello de agua	Tanque acumulador
Capacidad	2000 bbl	1800 gal	6000 gal
Presión de oper. (psig)	50	5	50
Temperatura de oper. (°F)	500	90	100
Nivel de líquido	50%	50%	100%

Fuente PDVSA.

Los quemadores instalados en las etapas son tubos verticales que poseen en la parte superior una corona soldada que funciona como hornilla de quemado. Estos equipos pueden operar con presiones de descarga de hasta 100 psig y la distribución de los orificios garantiza una mezcla adecuada aire-gas para proveer una combustión sin generar humo o completa.

Los quemadores de los mechurrios están formados por tres tuberías independientes, instaladas en una tubería matriz de canalización hacia el interior del mechurrio, ellas son:

- ❖ Una línea de alimentación de gas. La alimentación se realiza mediante una tubería que se introduce dentro de otra de diámetro mayor, a la entrada de cada uno de los conductos principales de canalización para obtener un efecto de eyección de aire al ambiente y garantizar una adecuada combustión del gas alimentado. Este sistema constituye el mezclador de aire – combustible.
- ❖ Una línea para alimentación de la mezcla de ignición, la cual proviene de un panel donde se genera la llama que enciende el piloto.
- ❖ Un conducto para la canalización de una termocupla que tiene como función verificar el estado del piloto (encendido o apagado).



A lo largo de la red de tuberías a través de la cual se desplazan los gases, se dispone de una serie de dispositivos de seguridad y control como medidores de presión, así como válvulas de regulación y otras.

Aunque las válvulas de seguridad son los dispositivos de alivio de presión más utilizados, en ciertas circunstancias no pueden dar una protección completa. Entonces se debe considerar la instalación de discos de ruptura. Los discos de ruptura, también llamados de seguridad o discos frágiles, son unos dispositivos de alivio de presión sin cierre repetido del mecanismo, accionados por diferencia de presión entre el interior y exterior y diseñados para funcionar por estallido o venteo del disco. Este tipo de dispositivos de control son los que se instalan en la red de tuberías del sistema de alivio que se describió anteriormente, debido a las condiciones de operación del mismo, caracterizadas por aumentos rápidos de presión y existencia de fluidos tóxicos y corrosivos que originarían un rápido deterioro de las válvulas.

El problema que se manifiesta en la actualidad en el sistema de alivio B-7351/B-7352 de la Refinería El Palito, consiste en la ruptura prematura de los discos de seguridad instalados en un arreglo tipo by-pass en las tuberías de 30 y 24 pulgadas, localizadas al final del cabezal de 36 pulgadas que conduce los gases hasta el mechurrio B-7352 (ver Figura I.1).

La finalidad de la colocación de estos dispositivos, es dejar pasar a gran escala los gases hacia el mechurrio, como medida de protección en caso de que ocurra una sobrepresión y las válvulas de control de flujo situadas en la tubería principal del by-pass no abran completamente, a pesar de ser ésta su condición de falla. Estos discos de ruptura, se encuentran diseñados para estallar cuando se alcance en la tubería una presión de 15 psig, sin embargo, la situación de falla del disco ocurre cuando en la tubería se tienen valores de presión alrededor de 5 psig.



Aunado a esto, al hacer el desmontaje de los discos para su sustitución presentan signos de que se han alcanzado altas temperaturas, lo cual no ocurre en condiciones normales de funcionamiento y es indicio de la existencia de irregularidades. Como 5 psig es un valor de presión que se alcanza durante la operación de alivio de los gases a través del sistema B-7352, los discos se rompen con mucha frecuencia. Inevitablemente, esto se traduce en un incremento del costo por mantenimiento y costos operacionales, ya que los mismos no tienen reparación y requieren ser sustituidos, por lo que se deben adquirir constantemente nuevos discos.

En vista del escenario planteado, se desea llevar a cabo un estudio que permita diagnosticar y analizar cuáles son las causas que originan la falla del disco fuera de su presión de ruptura de diseño, para así proponer medidas que permitan dar solución definitiva al referido problema.

1.2 FORMULACIÓN.

Determinación y análisis de la(s) causa(s) que origina(n) la falla por ruptura prematura del disco de seguridad instalado en las tuberías de 24 y 30 pulgadas de diámetro, que conducen los gases de alivio hacia el mechorrio B-7352 de la Refinería El Palito.



1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Analizar la falla operativa que genera la ruptura prematura del disco de seguridad instalado en una tubería del sistema de alivio de una planta refinadora de crudo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ❖ Estudiar las condiciones operativas bajo las cuales se realiza actualmente el proceso de alivio de gases (presión, temperatura, régimen y velocidad de los gases en el cabezal, tiempo de utilización del disco).
- ❖ Estudiar las condiciones de instalación del disco de ruptura en la tubería (apriete y colocación).
- ❖ Analizar el perfil de temperatura, perfil de presiones y la concentración de esfuerzos que generan en el disco.
- ❖ Analizar el material de construcción del disco para detectar posibles fallas en el mismo.
- ❖ Comparar el resultado del estudio de las condiciones operativas actuales del proceso con las condiciones preestablecidas para el mismo.
- ❖ Comparar las condiciones de instalación del disco con las especificaciones establecidas en normas para este aspecto.
- ❖ Determinar la certidumbre en el diagnóstico de la falla.
- ❖ Proponer una solución adecuada con un nivel de confiabilidad aceptable.



1.4 JUSTIFICACIÓN.

Un sistema de alivio de presiones garantiza la seguridad en las plantas de procesos, sobretodo en aquellas de alto riesgo donde se trata con fluidos y gases inflamables como es el caso de la Refinería El Palito. La función del disco de ruptura que se pretende estudiar es, al momento de su estallido, permitir el paso de los gases a gran escala hacia el mechurrio en caso de una sobrepresión, para que éstos sean quemados a la máxima capacidad y prevenir eventos en los cuales se pueda ver comprometida la integridad física de la planta y sus trabajadores. A consecuencia del problema de ruptura prematura, el mencionado dispositivo no puede cumplir su función de manera óptima y por ende origina alteraciones en el curso de las operaciones de alivio ya que debe ser sustituido inmediatamente después de su estallido, lo que trae como consecuencia, a su vez, el incremento de los costos de mantenimiento del sistema de alivio.

La investigación que se pretende llevar a cabo tiene su justificación en la necesidad de la empresa de determinar la causa del problema, para aplicar una solución apropiada que permita eliminar las contingencias y los gastos que resultan de la existencia del mismo.

Cabe destacar que para realizar este estudio con el que se pretende detectar una falla, será necesaria la aplicación en el campo de gran parte de los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica en todas sus áreas, como son aplicaciones de la térmica en lo que respecta a la determinación de los parámetros operacionales del proceso de alivio de gases; diseño, al realizar los análisis de las condiciones de instalación del disco y la concentración de esfuerzos así como el análisis de confiabilidad, finalmente el área de materiales es involucrada al realizar los análisis pertinentes sobre el material.



1.5 DELIMITACIÓN.

El seguimiento del proceso de alivio de los gases para la determinación de las condiciones operativas en cuanto a las variables de presión, temperatura, régimen y velocidad de los gases, se efectuará aguas abajo del separador horizontal ubicado en el cabezal colector principal de 42 pulgadas, que conduce los gases a la fosa de quemado B-7352. Específicamente el conjunto de tuberías asociadas a las etapas de quemado 8 y 9, incluyendo el subcabezal de 36 pulgadas y las tuberías de 24 y 30 pulgadas en la que están instalados los discos de ruptura.

La determinación de la certidumbre en el diagnóstico de la falla se realizará mediante aplicación del método de Análisis Causa Raíz.

1.6 LIMITACIONES.

Ausencia de información precisa sobre la composición de la mezcla de gases que son conducidos a través de la tubería en la que se encuentra instalado el disco de ruptura y los efectos que ésta produce sobre el mismo.

Ausencia, en los almacenes de la empresa, de discos de ruptura con las características especificadas por la empresa diseñadora del dispositivo de alivio en estudio, lo que imposibilitó la realización de un análisis del material de fabricación.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

TUMO, E. *NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características*. Notas Técnicas de Prevención del Instituto de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Disponible en http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_456.htm. Artículo en estatus vigente.

En esta Nota Técnica de Prevención, el autor publica una serie de términos y conceptos asociados a los discos de ruptura. Se contemplan las diversas situaciones que pueden originar una contingencia por sobrepresión, las condiciones de utilización y tipos de discos de ruptura, así como la manipulación general que se les debe dar. Igualmente explica su funcionamiento y montaje en combinaciones junto con las válvulas de seguridad y otros dispositivos en sistemas de alivio de presión.

Por último y como información de mayor relevancia para este trabajo especial de grado, se exponen los modos de fallo anormales de los discos de seguridad, entre los cuales se menciona la falla por ruptura prematura y las posibles causas que la originan; lo que constituye un punto de partida para la investigación en el establecimiento de los objetivos que se desean alcanzar y en el planteamiento de las hipótesis sobre el origen de la falla. [12]

TUMO, E. *NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado*. Notas Técnicas de Prevención del Instituto de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Disponible en http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_457.htm. Artículo en estatus vigente.

Este documento es el complemento de la Nota Técnica de Prevención 456. Contiene la información referente al dimensionado de los discos de ruptura. En él



se explica la metodología para realizar el cálculo del área necesaria de alivio, una vez que se haya determinado la pertinencia de la utilización de un disco de ruptura en un sistema de este tipo, teniendo en cuenta una serie de parámetros dependientes del fluido y de las condiciones de trabajo junto a las características de los equipos que se desean proteger. Esta información forma parte de las bases teóricas que sustentan la presente investigación. [13]

BOTTA, N. *El Accidente de Seveso*. Red Proteger. Higiene, Control y Seguridad. Disponible en:
http://www.redproteger.com.ar/Escuela%20de%20Seguridad/Grandes_Accidentes/seveso_1976.htm#_ftn1

En este artículo, se describe la cronología del Accidente de Seveso, ocurrido en el año 1976 en la Planta de Icmesa Chemical Company en Seveso, Italia, la cual se dedicaba a la producción de herbicidas y pesticidas con el uso de un reactor agitado por fuertes químicos e involucrando reacciones exotérmicas en las que se alcanzaban altas temperaturas comprendidas entre los 160 y 200 grados Celsius.

El sistema de protección del reactor se basaba en un disco de ruptura con escape a la atmósfera, el cual para el momento del accidente estalló y dejó escapar una nube cargada de partículas altamente tóxicas. Entre las razones que contribuyeron a agravar las consecuencias del evento se considera el inadecuado diseño del sistema de alivio y la ineficiente instalación del disco de ruptura como único sistema de protección y sin la conexión pertinente a un sistema de tratamiento de emisión de sustancias tóxicas. [11]



2.2 BASES TEÓRICAS.

2.2.1 CONCEPTOS Y PARÁMETROS SOBRE DISCOS DE RUPTURA.

❖ Disco de ruptura: Es el elemento componente resistente y sensible a la presión del dispositivo protector completo. Es sinónimo de disco de seguridad y disco frágil (ver Figura II.1).



Figura II.1. Disco de Ruptura. Fuente www.bsb.ie

- ❖ Presión de estallido o ruptura: Es el valor de la presión diferencial a través del disco de ruptura a la cual éste se abre.
- ❖ Razón o ratio de operación: Es la relación entre la presión máxima de trabajo y la presión mínima de estallido calculada mediante la siguiente fórmula:

$$Ratio = \frac{P_{m\acute{a}xTrab} * 100}{P_{m\acute{i}nEst}} \quad \text{Ec. II.1}$$

- ❖ Temperatura coincidente: Es la temperatura especificada junto a la presión de estallido. Esta presión disminuye al aumentar la temperatura.



- ❖ Presión máxima y mínima especificada de estallido: Es la presión máxima y mínima citada con su temperatura coincidente al especificar el funcionamiento del disco de ruptura. Es disco suministrado estallará en ese rango de presiones.
- ❖ Tolerancia de funcionamiento: Es la diferencia entre la presión máxima y mínima de estallido a la temperatura coincidente. [12]

2.2.2 CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Las válvulas de seguridad son los dispositivos de alivio de presión más utilizados, sin embargo, bajo ciertas condiciones de operación deben utilizarse discos de ruptura en lugar de éstas.

Las condiciones que deciden el uso de discos de ruptura en un determinado sistema, en lugar de válvulas de seguridad son:

- ❖ Aumentos rápidos de presión durante la operación.
- ❖ Existencia de fluidos tóxicos cuyo escape por una válvula de seguridad no está permitido. Las válvulas de seguridad tienen escape a la atmósfera.
- ❖ Fluidos corrosivos que pueden ocasionar un deterioro rápido de las válvulas de seguridad.
- ❖ Fluidos que pueden depositar sólidos o gomas que interfieran en el funcionamiento óptimo de las válvulas de seguridad. [12]

2.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Las principales ventajas de los discos de ruptura vienen dadas por su funcionamiento y economía. Permiten aislar completamente el fluido del lado anterior de descarga y a su vez, al estallar indican la ocurrencia de una



sobrepresión en el sistema. Tienen una respuesta instantánea y su apertura es completa. Son fabricados en una gama de metales y combinaciones o grafito, lo que permite un amplio rango de aplicación con respecto a la resistencia a la presión. Son más económicos en su compra y mantenimiento.

En contrapartida, sus inconvenientes principales son la imposibilidad de nuevo cierre por lo que es necesaria la detención del proceso en caso de estallido, para la reposición de uno nuevo. Algunas otras desventajas son:

- ❖ Requieren un margen amplio entre la presión de funcionamiento y la presión de diseño del sistema a proteger.
- ❖ La existencia de pulsaciones de presión puede ocasionar fallos prematuros si la presión de funcionamiento está demasiado cerca de la presión de estallido del disco.
- ❖ Al ser dispositivos que trabajan con presión diferencial, son sensibles a los cambios de la contrapresión, que es la presión estática existente a la salida de una válvula de seguridad o en la cara exterior de un disco de ruptura. [4] [12]

2.2.4 TIPOS DE DISCOS DE RUPTURA.

- ❖ Abovedado convencional: Es un disco de ruptura en forma curvada con su superficie cóncava enfrentada a la presión de estallido y está diseñado para fallar por tensión (ver Figura II.2). [12]

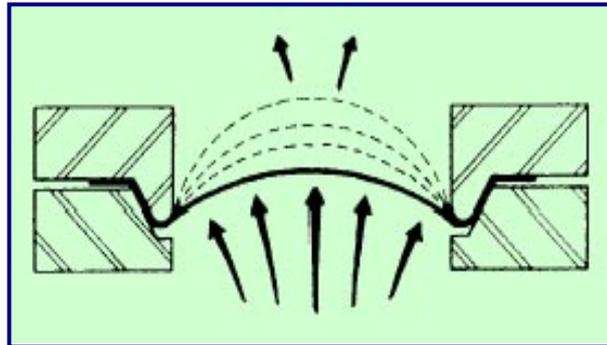


Figura II.2: Disco de ruptura abovedado convencional. Fuente NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características

A su vez, el abovedado convencional puede ser de tres formas, abovedada sencilla, compuesto o rasurado (ver Figura II.3). El disco abovedado sencillo es de espesor uniforme en todo su diámetro, mientras que el compuesto es multicapa y una de las capas con líneas ranuradas para reducir su resistencia y controlar la presión de estallido. Otra capa funciona como sello, normalmente es de teflón y ofrece una mayor resistencia a la corrosión. Por su parte, el disco abovedado ranurado, consta de un elemento único similar al sencillo, pero con unas ranuras o incisiones en el lado exterior al proceso. Es más robusto y menos susceptible a los daños que el abovedado sencillo (ver Figura II.3).



Figura II.3: Tipos de discos de ruptura abovedados convencionales. Fuente www.bsb.ie



El disco se coloca en una montura. Requiere un apoyo para presión inversa en caso de que no sea capaz de resistirla. Ese apoyo debe estar unido de forma permanente al disco de ruptura o diseñado de tal forma que solo se pueda instalar del lado correcto del disco (ver Figura II.4).



Figura II.4: Soporte para discos de ruptura. Fuente www.bsb.ie

❖ Abovedado invertido: Tiene forma curva con la superficie convexa enfrentada a la presión de estallido y está diseñado para fallar por fuerzas de pandeo, flexión o cizalladura (ver Figura II.5).

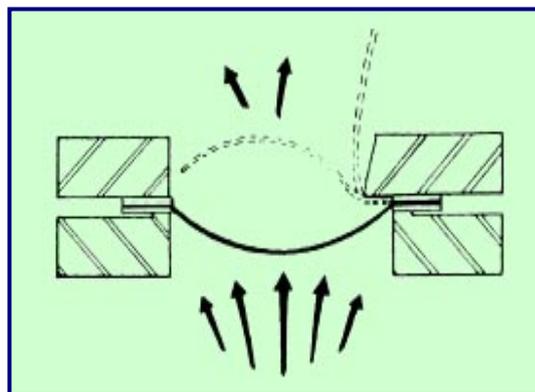


Figura II.5: Disco de ruptura abovedado invertido. Fuente NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características



La rotura de este tipo de discos puede estar ayudada por hojas de cuchillas aguas abajo del disco que lo cortan durante la inversión del bombeado (ver Figura II.6).

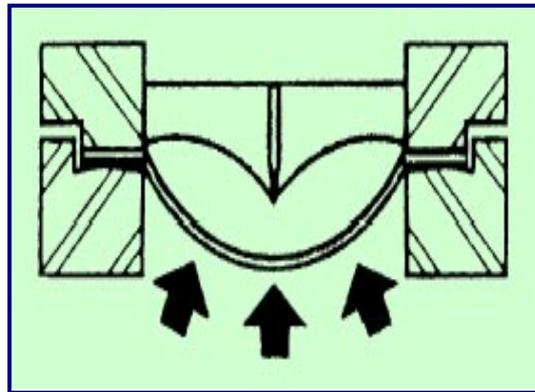


Figura II.6: Disco de ruptura abovedado invertido con hojas de cuchilla. Fuente NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características

Otra forma es a través de unas preincisiones que crean una línea de debilidad de forma que el disco falla a lo largo de éstas durante la inversión. También existe un disco de diseño deslizable o rasgable que falla al ser expedido aguas debajo de su montura. Se requiere normalmente un dispositivo de recogida para capturar los residuos.

El disco de ruptura abovedado invertido se caracteriza por ser varias veces más grueso que el disco convencional, es por ello que soporta niveles superiores de presión invertida o contrapresión y vacío sin necesidad de un soporte para ello. La vuelta del revés de un disco abovedado invertido representa un peligro en algunos diseños; un ligero aumento de presión o una presión disminuida debido a un daño, puede invertir la convexidad del disco evitando el estallido, de forma que se convierte en un disco convencional grueso. En ese caso la presión de estallido requerida es mucho mayor que la especificada, con consecuencias peligrosas.



❖ Disco de ruptura plano: Puede ser plano o ahuecado (rebajado). Si se emplea con una montura separada se le conoce como disco de ruptura sustituible (ver Figura N° II.7).

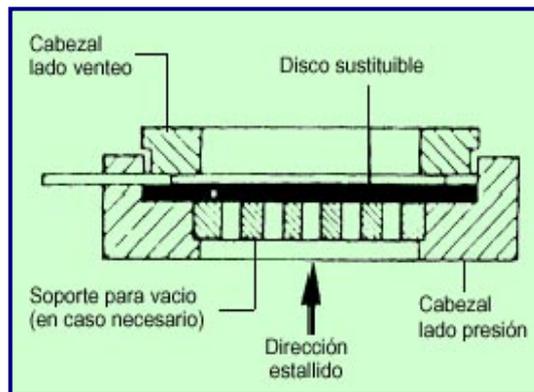


Figura N° II.7: Disco de ruptura plano. Fuente NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características

❖ Disco de ruptura monobloque: Es un disco ahuecado formando un todo con la montura, normalmente fabricada de grafito impregnado con una resina. El monobloque puede ser ahuecado por el lado de entrada, de salida o por ambos, con el hueco menor en el lado de la entrada. Es necesario que la presión de estallido se enfrente por el lado correcto del disco (ver Figura N° II.8).

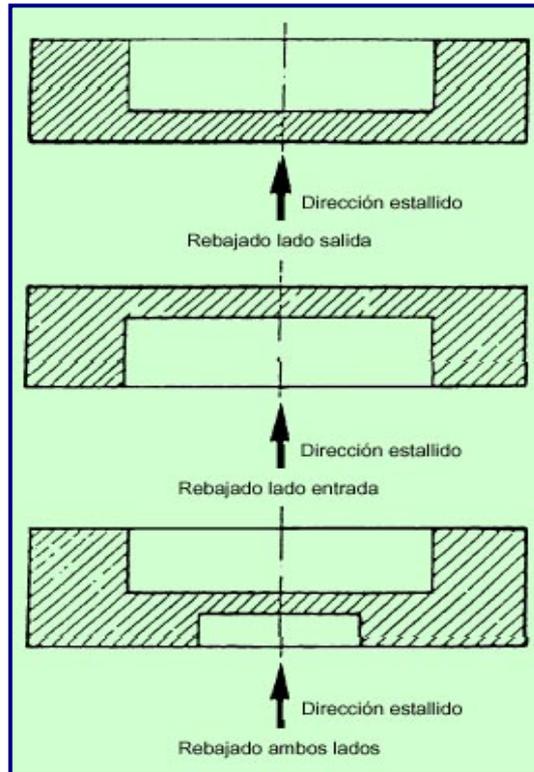


Figura N° II.8: Disco de ruptura monobloque. Fuente NTP 456 Discos de Ruptura (I):
Características

❖ Disco de presión ultrabaja: Es un tipo de disco de gran precisión en su presión de estallido. Está diseñado para proteger recipientes contra pequeñas presiones positivas o de vacío. [12]

2.2.5 SELECCIÓN DEL TIPO DE DISCO DE RUPTURA.

Los factores o variables que afectan la selección del tipo de disco de ruptura son:

- ❖ Posición del disco de ruptura en el sistema de alivio.
- ❖ Tipo de fluido, líquido o gas.



- ❖ Presiones requeridas de trabajo o estallido.
- ❖ Ratio de operación.
- ❖ Temperaturas y presiones uniformes, pulsantes o cíclicas (pasan de positivas a negativas) del lado del proceso.
- ❖ Existencia de condiciones corrosivas, polimerizaciones u otras especiales.
- ❖ Contrapresión o vacío que deba soportar el disco.

El disco abovedado convencional es el tipo básico, pero su aplicación queda limitada a aplicaciones sencillas sin pulsaciones de presión y con margen amplio (30% o más) entre la presión de trabajo y la presión de diseño.

Se debe considerar la utilización de los tipos compuesto ranurado y abovedado invertido en situaciones más exigentes como son:

- ❖ Disco sometido a presión pulsante.
- ❖ El margen disponible entre la presión de diseño y la presión de trabajo obliga a una tolerancia estrecha de la presión de estallido.
- ❖ Vida útil de trabajo de más de dos años. [12]

2.2.6 DIMENSIONADO DE DISCOS DE RUPTURA.

[14] Existen varios métodos para el dimensionado de discos de ruptura en la protección de sistemas de alivio. Para la elección de alguno de éstos, se debe partir del fenómeno a proteger. Dichos métodos se diferencian de acuerdo al fluido entre líquidos y gases y vapores.

El procedimiento que se describe a continuación, está relacionado directamente con la función del disco en estudio, que es la protección contra estallidos por



aumento de presión. En este caso el dimensionado se efectúa a través de expresiones deducidas de la mecánica de fluidos y adoptadas por los códigos de diseño más importantes. Entre estos se encuentran la Norma ISO 6718:1191, el Código ASME, la Norma API RP 520, la Norma BS 2915:1990, la Norma AD-Merkblatt A 1, los códigos NFPA (30,58), etc.

Al dimensionar discos de ruptura para sistemas que operen con gases y vapores se debe considerar la relación entre la presión absoluta en el interior del recipiente P_a y la presión absoluta en el exterior o contrapresión P_b ($P_b/P_a=1$, no hay flujo). Al incrementar la presión P_a el flujo va aumentando y decrece la razón P_b/P_a , hasta llegar al valor crítico denominado presión crítica, cuya expresión viene dada por:

$$P_{crít} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}} \quad \text{Ec. II.2}$$

En esta ecuación, K representa la razón de los calores específicos a presión y volumen constante ($K=C_p/C_v$) del fluido. En este punto, el flujo alcanza la velocidad del sonido. La consecuencia de esto es que se deben considerar dos casos de flujo, el sónico cuando $P_b/P_a \leq P_{crít}$ (condiciones críticas) y el subsónico cuando se cumpla que $P_b/P_a > P_{crít}$.

❖ Caso I: Gases y vapores con capacidad de descarga para flujo subsónico (subcrítico).

El área de la sección del disco de ruptura según fórmulas derivadas de la mecánica de fluidos sería:

$$A_0 = 3,469 * \left[\left(\frac{q_M}{C * Kb * \alpha} \right) * \left(\frac{v}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{Ec. II.3}$$



o su equivalente:

$$A_0 = \left[\left(\frac{q_M}{C * Kb * \alpha * P} \right) * \left(\frac{T * Z}{M} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (ISO6718:1191) \quad \text{Ec. II.4}$$

en las que:

- ❖ A_0 : Área del disco de ruptura (mm^2).
- ❖ C : Coeficiente que viene dado por la expresión:

$$C = 3,948 * \left[K * \left[\frac{2}{(K+1)^{\frac{(K+1)}{(K-1)}}} \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec II.5}$$

También se pueden obtener los valores de C calculados según el coeficiente isoentrópico K por la Tabla II.1.

Tabla II.1: Valores de C según coeficiente isoentrópico K .

K	C	K	C	K	C
0,4	1,65	1,02	2,41	1,42	2,72
0,45	1,73	1,04	2,43	1,44	2,73
0,5	1,81	1,06	2,45	1,46	2,74
0,55	1,89	1,08	2,46	1,48	2,76
0,6	1,96	1,1	2,48	1,5	2,77
0,65	2,02	1,12	2,5	1,52	2,78
0,7	2,08	1,14	2,51	1,54	2,79
0,75	2,14	1,16	2,53	1,56	2,8
0,8	2,2	1,18	2,55	1,58	2,82
0,82	2,22	1,2	2,56	1,6	2,83
0,84	2,24	1,22	2,58	1,62	2,84
0,86	2,26	1,24	2,59	1,64	2,85
0,88	2,28	1,26	2,61	1,66	2,86
0,9	2,3	1,28	2,62	1,68	2,87
0,92	2,32	1,3	2,63	1,7	2,89
0,94	2,34	1,32	2,65	1,8	2,94
0,96	2,36	1,34	2,66	1,9	2,99
0,98	2,38	1,36	2,68	2	3,04
0,99	2,39	1,38	2,69	2,1	3,09
1,001	2,4	1,4	2,7	2,2	3,13

Fuente NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado



❖ K_b : Es un factor de corrección que reduce la capacidad de descarga debido a incrementos de la contrapresión. Para flujo crítico $K_b=1$. Se calcula utilizando la expresión:

$$K_b = \frac{\left[\frac{2K}{(K-1)} * \left[\left(\frac{P_b}{P} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_b}{P} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right] \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[K * \left[\frac{2}{(K+1)} \right]^{\frac{(K+1)}{(K-1)}} \right]} \quad \text{Ec. II.6}$$

Las otras variables involucradas son:

- ❖ M : Masa molecular en Kg/mol.
- ❖ P : Presión de alivio en bar absolutos.
- ❖ P_b : Contrapresión inmediatamente aguas abajo del área de la sección transversal mínima en bar absolutos.
- ❖ q_m : Flujo máximo a descargar o la capacidad requerida de descarga del disco de ruptura en Kg/h.
- ❖ T : Temperatura absoluta de alivio en Kelvin.
- ❖ v : Volumen específico a la presión y temperatura de alivio en m^3/Kg .
- ❖ Z : Factor de compresibilidad. Se determina mediante la Figura II.9.
- ❖ α : Coeficiente de descarga según el tipo de boquilla, debiéndose cumplir que $0,5 A_1 \leq A_0 \leq A_1$, siendo A_1 el área de la sección transversal del conducto de entrada en mm^2 . Se obtiene de la Tabla II.3; para configuraciones distintas a las que allí aparecen, se deben realizar ensayos para determinar este coeficiente. El coeficiente establecido experimentalmente deberá multiplicarse por 0,9 antes de aplicar las fórmulas de cálculo de A_0 . [13]



También se pueden obtener los valores de K_b calculados según el coeficiente isoentrópico K por la Tabla II.2.

Tabla II.2: Factor de corrección K_b de la capacidad de descarga de la contrapresión.

E/P	Exponente isoentrópico k																		
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.001	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
	Factor de corrección de la capacidad por contrapresión K_b																		
0.45																	1,000	0,999	0,999
0.5												1,000	1,000	0,999	0,998	0,996	0,994	0,992	0,989
0.55									0,999	1,000	0,999	0,997	0,994	0,991	0,987	0,983	0,979	0,975	0,971
0.6							1,000	0,999	0,997	0,993	0,939	0,983	0,978	0,972	0,967	0,961	0,955	0,950	0,945
0.65						0,999	0,995	0,989	0,982	0,974	0,967	0,959	0,951	0,944	0,936	0,929	0,922	0,915	0,909
0.7			0,999	0,999	0,993	0,985	0,975	0,964	0,953	0,943	0,932	0,922	0,913	0,903	0,895	0,886	0,879	0,871	0,854
0.75		1,000	0,995	0,983	0,968	0,953	0,938	0,923	0,909	0,896	0,884	0,872	0,861	0,851	0,841	0,832	0,824	0,815	0,808
0.8	0,999	0,985	0,965	0,942	0,921	0,900	0,881	0,864	0,847	0,833	0,819	0,806	0,794	0,783	0,773	0,764	0,755	0,747	0,739
0.82	0,992	0,970	0,944	0,918	0,894	0,872	0,852	0,833	0,817	0,801	0,787	0,774	0,753	0,752	0,741	0,732	0,723	0,715	0,707
0.84	0,979	0,948	0,917	0,888	0,862	0,839	0,818	0,799	0,782	0,766	0,752	0,735	0,727	0,716	0,706	0,697	0,688	0,680	0,672
0.86	0,957	0,919	0,884	0,852	0,800	0,779	0,759	0,742	0,727	0,712	0,700	0,688	0,677	0,667	0,667	0,658	0,649	0,641	0,634
0.88	0,924	0,881	0,842	0,809	0,780	0,755	0,733	0,714	0,697	0,682	0,668	0,655	0,644	0,633	0,624	0,615	0,606	0,599	0,592
0.9	0,880	0,831	0,791	0,757	0,728	0,703	0,681	0,662	0,645	0,631	0,617	0,605	0,594	0,584	0,575	0,566	0,558	0,551	0,544
0.92	0,820	0,769	0,727	0,693	0,664	0,640	0,619	0,601	0,585	0,571	0,559	0,547	0,537	0,527	0,519	0,511	0,504	0,497	0,490
0.94	0,739	0,687	0,647	0,614	0,587	0,565	0,545	0,528	0,514	0,501	0,489	0,479	0,470	0,461	0,453	0,446	0,440	0,434	0,428
0.96	0,628	0,579	0,542	0,513	0,489	0,469	0,452	0,438	0,425	0,414	0,404	0,395	0,387	0,380	0,373	0,367	0,362	0,357	0,352
0.98	0,426	0,422	0,393	0,371	0,353	0,337	0,325	0,319	0,305	0,296	0,289	0,282	0,277	0,271	0,266	0,262	0,258	0,256	0,251
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado

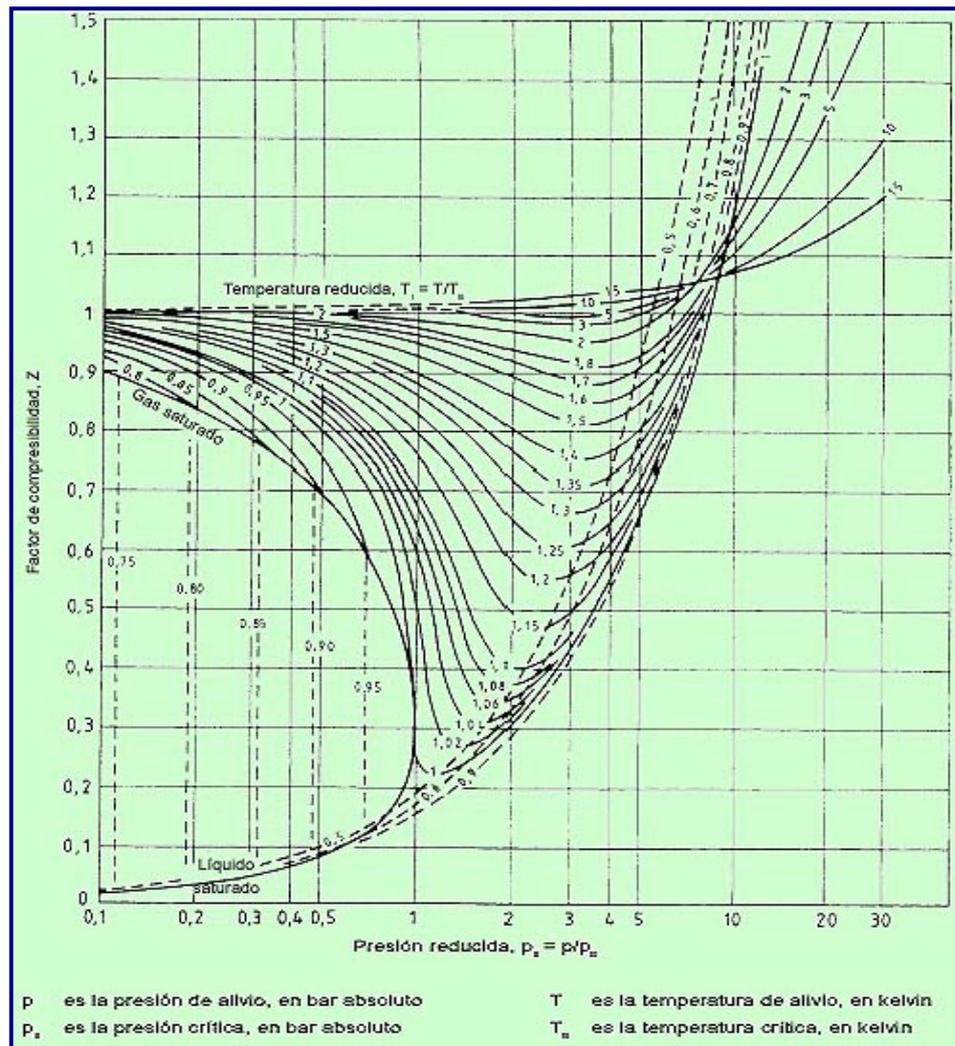
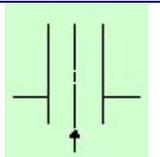
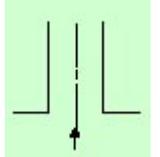
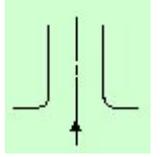


Figura II.9: Factor de compresibilidad Z en función de la presión y la temperatura reducidas. Fuente NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado

Tabla II.3: Coeficientes de descarga α según tipo de boquilla.

Nº	Tipo de boquilla	Coefficiente de descarga α (fluidos compresibles)
1	 Boquilla saliente	0,68
2	 Boquilla encastrada o rebajada y también una brida maciza (formando bloque) con diseño de configuración no hidrodinámica	0,73
3	 Brida maciza (formando bloque) de configuración hidrodinámica, p.e. con bordes de entrada redondeados o achaflanados y también con orificio rebordeado hacia fuera	0,80

Fuente NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado

2.2.7 FALLAS EN DISCOS DE RUPTURA.

Los modos de falla en discos de ruptura son más importantes por sus consecuencias que por su frecuencia. Los que ocurren con mayor frecuencia son:

- ❖ Falla por no romper a la presión máxima de estallido (crítico).
- ❖ Falla por no abrir completamente a la presión máxima de estallido (crítico).
- ❖ Rotura prematura por debajo de la presión mínima de estallido, lo que representa una inconveniencia de tipo económica, no es peligrosa excepto si el sistema de contención o recogida no es adecuado. Es el tipo de falla que se presenta con mayor frecuencia.
- ❖ Fuga a través del disco de ruptura hacia el venteo por existencia de grietas o poros. No se presenta a menudo y es la menos importante.



❖ Fuga hacia la atmósfera a través del soporte o montura. Igualmente es de baja importancia, se presenta muy poco.

También se cita como causa de falla la corrosión, particularmente en discos de níquel debido a la contaminación por sulfuros de la atmósfera, así como suciedad atmosférica que penetra en las cavidades del disco y cabezales; otras como suministro de discos de poco espesor. [12]

2.2.8 CAUSAS DE FALLA POR RUPTURA PREMATURA.

Un análisis de las causas de falla por ruptura prematura muestra que esto puede suceder debido a:

- ❖ Especificación incorrecta del disco por no tener en cuenta condiciones intermitentes de vacío y otras situaciones transitorias de presión/temperatura, no previsión de corrosiones, funcionamiento del proceso a una presión demasiado cercana a la presión de ruptura, lo que origina fallas por fatiga del material.
- ❖ Daños al disco por manipulación indebida antes de la instalación o durante el mantenimiento.
- ❖ Instalación incorrecta del disco, principalmente por montaje defectuoso.
- ❖ Disco dañado o con defecto, no detectado durante la operación de instalación.
- ❖ Disco mantenido en servicio más tiempo que el recomendado.
- ❖ Montaje, por equivocación, de un disco incorrecto. [12]

2.2.9 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE ALIVIO EN EL QUE SE ENCUENTRA INSTALADO EL DISCO DE RUPTURA.

El sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, es un avanzado diseño en mechurrios de combustión “sin humo” o completa, para el alivio de bajas a altas ratas de flujo, lo cual se logra a través de un sistema de control de presiones y flujo, capaz



de mantener la mezcla de gas – aire en los niveles de energía adecuados. Los niveles de energía requeridos son logrados a través de una velocidad de descarga sin la adición de una energía adicional. El sistema de control permite, cuando el nivel de flujo es bajo, reducir el número de quemadores en función de suministrar combustible suficiente para mantener los niveles de energía óptimos para que se lleve a cabo una combustión limpia o completa.

Cuando la presión se incrementa, se alcanza un punto en el que el flujo no puede ser quemado de manera eficiente por el número de quemadores en servicio. Al ocurrir esta condición, un transmisor envía una señal, indicando la necesidad de abrir etapas adicionales. Cuando el flujo decrece, el número de quemadores se reduce de manera inversa a como fueron abiertos, garantizando así el control de los niveles de energía y la combustión “sin humo”.

El sistema de control consiste de un controlador lógico programable (PLC), el cual recibe una señal proveniente del transmisor de presión, la cual le permite abrir o cerrar las estaciones de válvulas. Cada estación de válvulas puede ser operada manual o automáticamente por un actuador de falla abierta, el cual abre o cierra en cinco segundos o de acuerdo a la demanda.

Los discos de ruptura, están incluidos en el esquema de control de flujo para la protección de los equipos por válvulas de alivio. Ellos permiten cubrir la capacidad total del sistema de alivio, para garantizar una operación segura de la planta, en caso de un evento y falla de las válvulas. La presión de ruptura de los discos utilizados, es 1,5 veces la presión de control. [8]

2.2.10 ACEROS INOXIDABLES.

Los aceros inoxidable se seleccionan como materiales de ingeniería principalmente por su excelente resistencia a la corrosión en muchos ambientes.



La resistencia a la corrosión en este tipo de aceros se debe a su elevado contenido de cromo, ya que contienen más de un 12%. El cromo, forma un óxido superficial que protege la aleación hierro – cromo interior de la corrosión.

En general existen cuatro tipos de aceros inoxidable: Ferríticos, martensíticos, austeníticos y endurecidos por precipitación. [10]

2.2.11 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.

El disco de ruptura objeto de esta investigación está elaborado en un acero inoxidable austenítico de la serie 300, específicamente acero 316; las características generales de los aceros inoxidables austeníticos se describen a continuación.

Los aceros inoxidables austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias de hierro – cromo – níquel que contienen aproximadamente entre 16% y 25% de cromo y de un 7% a 20% de níquel. Estas aleaciones se llaman austeníticas porque su estructura se mantiene como austenita (FCC, hierro tipo Gamma γ) a la temperatura de los tratamientos térmicos normales. La presencia del níquel que tiene una estructura FCC, permite retener la estructura FCC (Cúbica Centrada en las Caras) a temperatura ambiente. La elevada conformabilidad de los aceros inoxidables austeníticos se debe a su estructura FCC.

Las propiedades básicas de los aceros inoxidables austeníticos son: Excelente resistencia a la corrosión general, excelente soldabilidad, gran ductilidad, formabilidad y trabajabilidad, como su facilidad de limpieza e higiene, buenas propiedades a alta temperatura y excelentes a baja temperatura, no magnéticos (si recocidos) y endurecibles por trabajo en frío. Son utilizados en la industria alimentaria, industria cervecera y de bebidas gaseosas, industria química,



arquitectura y aplicaciones que no involucren atmósferas o fluidos de alta corrosividad.

Los aceros inoxidable austeníticos tienen normalmente mejor resistencia a la corrosión que los ferríticos y los martensíticos, porque los carburos pueden ser retenidos en disolución sólida por enfriamiento rápido desde temperaturas elevadas. Sin embargo, si estos aceros se encuentran sometidos a temperaturas entre 425°C y 850°C, son susceptibles de corrosión intergranular y se tornan sensibilizados, puesto que los carburos conteniendo cromo, precipitan en el límite de grano. La sensibilización resulta en la disminución del cromo en las zonas cercanas a los límites de grano del material. El grado de sensibilización, es decir, la cantidad de carburos de cromo formados en el límite de grano, depende del contenido de carbono en el acero, la temperatura a la que se encuentre sometido y el tiempo de exposición.

Esta dificultad puede ser obviada en cierto grado, disminuyendo el contenido de carbono de la aleación, hasta un 0,03% o añadiendo un elemento a la aleación como el niobio, para que se combine con el carbono. La utilización de estabilizadores tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio. [10] [17]

2.2.12 CARGAS EN DISCOS DE RUPTURA.

Los discos de ruptura son elementos diseñados para estallar por las cargas de tensión, flexión, pandeo o cizalladura debidas a la diferencia de presiones existentes en la tubería donde se encuentren instalados entre el lado del proceso y el lado posterior del disco. Los sistemas que requieren la utilización de discos de



ruptura, por lo general, operan con cargas de presión pulsante o no constante, lo que implica variaciones en los valores de la diferencia de presión existente a ambos lados del disco, originando cargas cíclicas.

En el caso del disco de ruptura abovedado convencional, la apertura tiene lugar por la tensión a la que se encuentra sometido el dispositivo. Si éste posee ranuras, ellas disminuyen su resistencia y permiten controlar la presión de estallido porque actúan como concentrador de esfuerzos. [12]

2.2.13 ESFUERZOS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDOS.

[9] Con frecuencia en diseño se plantea la hipótesis de que existe una distribución uniforme de esfuerzo. Generalmente, al resultado obtenido con esta suposición se le llama tensión pura, compresión pura o cortante puro, dependiendo de cómo se aplique la carga externa al cuerpo en estudio. A veces se emplea la denominación de simple en vez de puro, para expresar que no hay esfuerzos complicantes. Un ejemplo típico de este caso es una barra en tensión. La hipótesis de esfuerzo uniforme significa que si se corta la barra en una sección transversal alejada de ambos extremos, y se separa una de las mitades, es posible sustituir su efecto aplicando una fuerza uniformemente distribuida de magnitud σA en el extremo cortado. Entonces se dice que el esfuerzo σ está uniformemente distribuido y se calcula por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. II.7}$$

2.2.14 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR).

El Análisis Causa Raíz (ACR) es una metodología disciplinada que permite identificar las causas físicas, humanas y latentes de cualquier tipo de falla o



incidente que ocurre una o varias veces permitiendo adoptar las acciones correctivas que reducen los costos del ciclo de vida útil del proceso y mejora la seguridad o confiabilidad del negocio. [14]

2.2.15 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.

La realización de un ACR, comprende los siguientes pasos:

❖ Paso 1: Identificar los eventos más significativos.

Comprende identificar los problemas específicos que están originando la situación de funcionamiento inadecuado. Dichos problemas pueden ser de dos tipos:

- ✓ Problemas o eventos esporádicos: Son aquellos que causan una cantidad considerable de caos cuando aparecen. La naturaleza de estos es su característica más importante. Algunos de ellos son: Incendios, explosiones, virus en computadoras, huelgas, otro.
- ✓ Problemas o eventos crónicos: Ocurren una y otra vez y por las mismas razones aparentes. Tienen una alta frecuencia de ocurrencia, pero el estado normal se mantiene a pesar de su existencia.

❖ Paso II: Preservar las evidencias de fallas.

Es el punto en el que se comienza a analizar el problema o evento específico. Se lleva a cabo mediante la recolección de datos que es una parte integral del ACR. Sin la información de falla, es virtualmente imposible descubrir la causa raíz. En esta etapa, puede ser aplicada la metodología de las 5 P's (Partes, Posición, Personas, Papel, Paradigmas).

- ✓ Partes: Se refiere al equipo o componente que falla.



- ✓ Posición: Ubicación física del equipo o componente en falla. Posición física de las máquinas, equipos, instrumentos, niveles de presión, personal en la hora de ocurrencia, información ambiental. Etc.
- ✓ Personal: Entrevistas al personal involucrado en la falla. Entrevistas al personal de mantenimiento, operaciones, administración, manejo, calidad, otros necesarios.
- ✓ Papel: Localización de todos los reportes escritos relacionados con la falla. Reportes de mantenimiento, políticas, planos, cuarto de control, procedimientos, especificaciones, entrenamientos, documentación del fabricante, historiales, otro.
- ✓ Paradigmas: Frases comunes que el personal de operaciones usa para evitar investigaciones o desarrollar alguna actividad de mejora: “No tenemos tiempo para un ACR”, “Hemos tratado de resolverlo desde hace años”, “Es un equipo viejo y por supuesto falla”, “Siempre ha funcionado así”, “Esto es imposible de resolver”...

❖ Paso III: Preparar el análisis.

Es la organización del equipo de trabajo y el procedimiento. La forma convencional de formar un equipo de análisis es mediante la asignación de un grupo de personas que deben ser expertos y tener conocimientos directamente relacionados con los problemas a analizar. El ACR debe ser dirigido por un facilitador y el resto del equipo lo conforma un grupo multifuncional que varía según el tipo de problema.

❖ Paso IV: Construir el Árbol Lógico de Fallas.

El análisis debe continuar con la construcción estructurada del árbol lógico de fallas con niveles de causa y efecto. El árbol lógico trata estrictamente con datos



reales y utiliza la lógica deductiva para trabajar sistemáticamente a través del problema, para llegar a la causa raíz real. Los pasos para construir un árbol lógico de fallas son:

- ✓ Describir el evento de falla.
- ✓ Describir los modos de falla.
- ✓ Hacer una lista de las causas potenciales de falla y verificarlas.
- ✓ Determinar y verificar las causas raíz físicas.
- ✓ Determinar y verificar las causas raíz humanas.

Los dos primeros niveles del árbol lógico consideran todos los “hechos conocidos” del problema a analizar y conforman la Caja Superior, que representa la definición de la falla. El primer nivel es la declaración del evento, la razón por la que se está analizando el problema. El segundo nivel representa los modos del problema, pudiéndose analizar los modos de falla como las causas aparentes del evento. En el tercer nivel se procede a formular hipótesis de cómo puede haber ocurrido (ver Figura N° II.10).

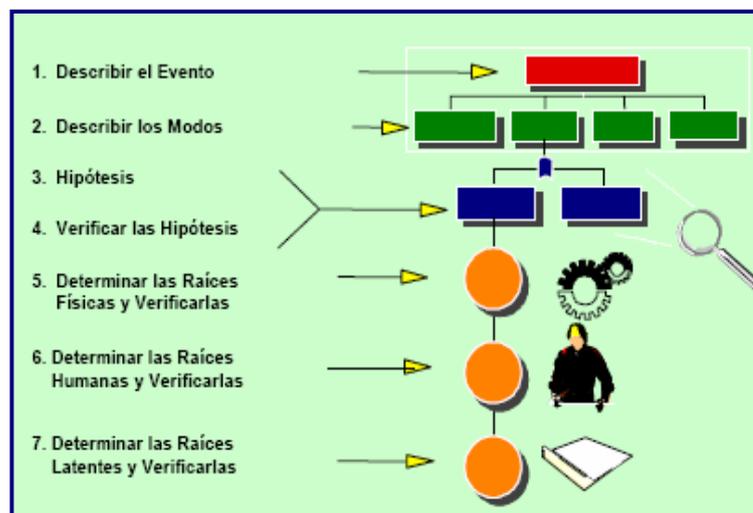


Figura N° II.10: Árbol Lógico de Falla. Fuente El Análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional



El siguiente paso es el más crítico, se trata de la verificación de las hipótesis. Se debe verificar cada hipótesis para determinar cuál es verdadera y cuál no. La verificación de las hipótesis da la confianza necesaria para llegar a las causas raíz correctas. Este proceso de lógica deductiva y verificación se reitera una y otra vez hasta que todas las raíces se determinan adecuadamente.

❖ Paso V: Comunicar los resultados y las evaluaciones.

El análisis de fallas y la verificación de las hipótesis determinan las causas raíz físicas, humanas y del sistema para cualquier tipo de falla. Comunicar los resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos en la aplicación de lo ACR, así como las recomendaciones asociadas.

❖ Paso VI: Hacer seguimiento a los resultados.

El ACR sería una actividad sin valor agregado si no se actúa sobre las recomendaciones y las soluciones no son implementadas en el tiempo establecido. Es primordial que se tome el control de las operaciones en vez de permitir que las operaciones tomen el control de la organización. Para poder obtener los recursos necesarios para dedicar al trabajo futuro, ya sea de mejora, corrección o rediseño, se deben analizar los problemas hasta la causa raíz y actuar de acuerdo con los resultados de dicho análisis. [14]



CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.

3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.

El proyecto a realizar pertenece a la categoría de investigación de campo y de acuerdo a los objetivos planteados y actividades a realizar, se encuentra en un nivel explicativo. Con éste se pretende responder las causas del problema en estudio, explicar por qué ocurren determinados fenómenos propios del mismo y en qué condiciones se dan. [5]

Durante el desarrollo de esta investigación, la recolección de datos comprenderá medición de las variables fundamentales involucradas en el proceso de alivio de gases así como recolección de datos en campo a través de entrevistas, información y material suministrado por el personal capacitado. Igualmente, se realizará un seguimiento mediante el historial de fallas y ensayos realizados para determinar las causas del problema; se realizarán las pruebas necesarias y sus resultados se analizarán cuidadosamente con el fin establecer el origen del problema de falla prematura en los discos el cual se traduce, en condiciones inseguras de operación y pérdidas económicas para la empresa.

En este sentido, la investigación se ocupará de la determinación de la o las causas, mediante la prueba de hipótesis y finalmente Análisis Causa Raíz. Los resultados y conclusiones de la misma, constituyen un nivel profundo de conocimientos.



3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

De acuerdo a los objetivos planteados, el proyecto está estructurado en cinco etapas, dentro de las cuales se cubren los pasos para la realización del Análisis Causa Raíz y se describen a continuación.

3.2.1 Etapa I: Exploración.

Esta fase comprende la búsqueda de información en los departamentos involucrados en el diseño, operación y mantenimiento del mechorrio B – 7352, así como la recolección de datos en campo. Para efectos del Análisis Causa Raíz previsto en los objetivos, esta etapa denominada Exploración cubre los pasos I y II descritos en el capítulo anterior. Las actividades previstas, asociadas a esta etapa son:

- ✓ Búsqueda de información en archivos de Planoteca (planos, catálogos, hojas de especificaciones de los equipos involucrados).
- ✓ Identificación del tipo de discos utilizados (características).
- ✓ Búsqueda de historiales de falla de los discos.
- ✓ Búsqueda de informes de las operaciones de reposición de discos fallados.
- ✓ Chequeo de planes de calidad por parte de PDVSA, orientados al mantenimiento de las instalaciones del mechorrio B – 7352.
- ✓ Búsqueda de informes de análisis realizados a los discos por parte de PDVSA.
- ✓ Inspección de las condiciones de almacenaje de los discos antes de su colocación.
- ✓ Levantamiento de las condiciones operacionales actuales del sistema: Presión y temperatura, mediante la medición directa en campo de dichas variables, y



velocidad de los gases en las tuberías donde se encuentran instalados los discos de ruptura mediante la evaluación hidráulica de la red que constituye el sistema de alivio.

- ✓ Entrevistas con proveedores y personal de los departamentos de: Procesos, Operaciones y Mantenimiento.

3.2.2 Etapa II: Evaluación.

En esta etapa las actividades que se contemplan están destinadas a la evaluación cualitativa de las condiciones de operación de los discos de ruptura. Para ello se prevé realizar un análisis detallado de la información obtenida en la fase anterior, mediante la observación de las condiciones actuales con las condiciones establecidas en normas, recomendaciones de los fabricantes y criterios de diseño en lo que respecta a los discos de ruptura, instalación y condiciones de operación para un funcionamiento confiable. Todas estas acciones permitirán establecer hipótesis sobre el origen de la falla del dispositivo en estudio, que serán reflejadas en el Árbol Lógico de Falla del Análisis Causa Raíz.

3.2.3 Etapa III: Determinación.

Esta etapa está orientada hacia la evaluación cuantitativa de las condiciones de operación de los dispositivos. Comprende la determinación de los parámetros de operación mediante cálculos, en los casos que así se requiera. Los cálculos y análisis se realizarán a partir de la data obtenida de las mediciones a efectuar sobre las variables del proceso de alivio de gases durante la fase de exploración.



En primer lugar se realizará el levantamiento de las condiciones operacionales del sistema, para tal fin se efectuarán mediciones directas de las variables fundamentales del proceso como son la presión y la temperatura. Con la data obtenida, se elaborará un diagrama para la visualización del comportamiento de las mismas.

En el caso de la variable de velocidad de los gases en las tuberías donde se encuentran instalados los dispositivos en estudio, será necesaria la evaluación hidráulica de la red que conforma el sistema para determinar los caudales que se manejan en los puntos de interés y a partir de estos obtener los valores de la velocidad. La evaluación se realizará mediante métodos gráficos, aplicando los principios y ecuaciones de la Ley de la Conservación de la Energía y la Ley de la Conservación de la Masa. Con los valores calculados de los caudales que circulan por las tuberías de 24 y 30 pulgadas en las que se encuentran instalados los discos de ruptura y los datos conocidos sobre las dimensiones de las tuberías, será posible determinar el valor de la velocidad con que fluyen los gases de alivio a través de las mismas.

Posteriormente, se determinarán los valores de carga que soportan los discos de ruptura de acuerdo a la presión y se evaluarán los esfuerzos debidos a las mismas aplicando método de elementos finitos, haciendo uso del software Visual Nastran, lo que permitirá visualizar las zonas más esforzadas así como el efecto de las cargas sobre el dispositivo.

Es de hacer notar que se utilizarán las unidades del Sistema Internacional para expresar los resultados de las mediciones y los valores obtenidos en los cálculos. El procedimiento a utilizar para la evaluación hidráulica de la red, determinación de las cargas debidas a la presión y evaluación de esfuerzos se describe a continuación.



❖ Calcular la disponibilidad en los puntos del sistema en los que se conozcan las variables que permitan calcular este valor. [3] La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \quad \text{Ec. III.1}$$

donde:

H: Disponibilidad (m. c. fluido)

P: Presión (KPa)

γ : Peso específico (KN/m³)

V: Velocidad (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

Z: Altura del punto en estudio respecto a la referencia (m)

❖ Calcular las pérdidas por fricción en el conjunto de tuberías y accesorios que conforman la red. En primer lugar, se toman valores de caudal de flujo de alivio en concordancia con las capacidades máximas de alivio por cada etapa, ya que posteriormente se construirán las curvas de comportamiento hidráulico de los tramos, por lo que se necesitan los valores de las pérdidas en función del caudal. Para cada valor de caudal y cada uno de los tramos del arreglo se determinará el Número de Reynolds (Ecuación III.2). [3]

$$Re = \frac{dV\rho}{\mu} \quad \text{Ec. III.2}$$

donde:



Re: Número de Reynolds (adimensional)

d: Diámetro interno de la tubería (m)

V: Velocidad del fluido en la tubería (m/s)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

μ : Viscosidad dinámica (Pa.s)

Luego, se calculará el factor de fricción para los diferentes diámetros de las tuberías que forman el sistema de alivio en estudio, haciendo uso de la Ecuación Explícita de Churchill (Ecuación III.3) [3], la cual presenta la ventaja de ser válida para cualquier tipo de régimen y tubería.

$$f = 8 \left\{ \left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \left[\left(2,457 \text{Ln} \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)} \right) \right)^{16} + \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \right]^{\frac{-3}{2}} \right\}^{\frac{1}{12}} \quad \text{Ec. III.3}$$

donde:

f: Factor de fricción (adimensional)

Re: Número de Reynolds (adimensional)

ε/D : Rugosidad relativa de la tubería (adimensional)

Una vez conocido el factor de fricción y con los datos sobre las tuberías y los accesorios, se aplicará el Método de la Longitud Equivalente para conocer el valor total de las pérdidas según la Ecuación III.4. [3]

$$hf = f \frac{(L_{\text{tramo}} + L_{\text{eqaccesorios}}) V^2}{D \cdot 2g} \quad \text{Ec. III.4}$$



donde:

h_f : Pérdida total por fricción en tuberías y accesorios (m. c. fluido)

L_{tramo} : Longitud del tramo (m)

$L_{\text{eqaccesorio}}$: Longitud equivalente de los accesorios del tramo en estudio (m)

V : Velocidad del fluido (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

❖ Construcción de las curvas de comportamiento hidráulico de los tramos, para lo cual se requiere aplicar las ecuaciones de Balance de Energía y Balance de Masa sobre la red, teniendo en cuenta lo siguiente:

Ecuaciones para aplicar Balance de Energía:



Figura III.1: Puntos genéricos para aplicar balance de energía. Fuente propia.

$$H_A = H_B + hf_{AB} \quad \text{Ec. III.5}$$

donde:

H_A : Disponibilidad en el punto A (m. c. fluido)

H_B : Disponibilidad en el punto B (m. c. fluido)

hf_{AB} : Pérdidas por fricción totales en tuberías y accesorios en el tramo comprendido entre el punto A y el punto B (m. c. fluido)



Ecuaciones para aplicar Balance de Masa:

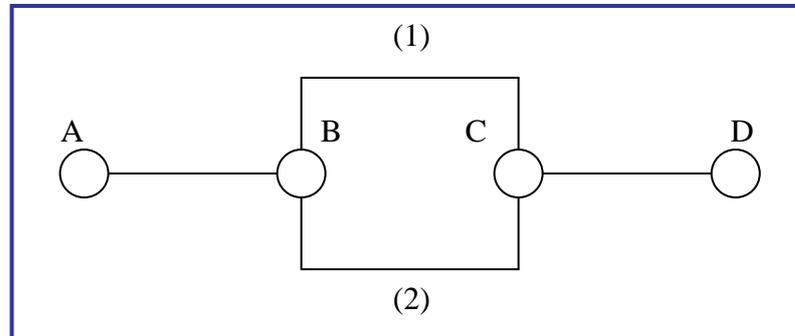


Figura III.2: Puntos genéricos para aplicar Balance de Masa. Fuente propia.

$$Q_{AB} = Q_{BC}(1) + Q_{BC}(2) = Q_{CD} \quad \text{Ec. III.6}$$

$$Q_{BC}(1) = Q_{BC}(2) \quad \text{Ec. III.7}$$

donde:

Q_{AB} : Caudal que circula por el tramo AB (m^3/s)

$Q_{BC}(1)$: Caudal que circula de b a c por el tramo BC(1) (m^3/s)

$Q_{BC}(2)$: Caudal que circula de b a c por el tramo BC(2) (m^3/s)

Q_{CD} : Caudal que circula por el tramo CD (m^3/s)

Teniendo en cuenta estas ecuaciones y aplicándolas sobre el arreglo de tuberías a estudiar se construirán las curvas de comportamiento de cada uno de los tramos hasta obtener los parámetros incógnitas (disponibilidad y caudal) en los puntos del sistema donde se encuentran instalados los discos de ruptura (ver Figura I.1, Capítulo I, pág. 4).



❖ Cálculo de las cargas debidas a la presión. Una vez determinados los parámetros de disponibilidad y caudal en los puntos de interés, se determinará la velocidad del fluido haciendo uso de la Ecuación III.8:

$$Q = V.A \quad \text{Ec. III.8}$$

donde:

Q: Caudal (m³/s)

V: Velocidad del fluido (m/s)

A: Área de la sección transversal de la tubería (m²)

Con el valor de velocidad obtenido se despejará del término de disponibilidad el valor de la presión que actúa sobre cada uno de los discos de ruptura, utilizando para esto la Ecuación III.1. Al determinar la presión, es posible conocer la carga que ésta produce sobre los discos, considerando que por condiciones de diseño de los mismos es posible plantear la existencia de una distribución uniforme de esfuerzos. Para tal fin, el valor de la carga se obtiene a partir de la Ecuación III.9:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. III.9}$$

donde:

P: Presión que actúa sobre el disco de ruptura (KPa)

F: Carga debida a la presión (KN)

A_d: Superficie del disco enfrentada a la presión del proceso (m²)



La evaluación de la carga se realizará para cada uno de los valores de presión calculados sobre los discos de ruptura de acuerdo a la cantidad de mediciones realizadas. Las dimensiones de los discos a evaluar se muestran en el plano de especificaciones del fabricante, contenidas en el anexo X del presente trabajo.

❖ Determinación del esfuerzo que soportan los discos mediante uso de software Visual Nastran. Para llevar a cabo esta actividad se realizará el diagrama de cuerpo libre de los discos de ruptura sometidos a carga y a las condiciones de instalación. Seleccionando el valor de carga crítico de los determinados en el paso anterior e introduciendo las condiciones según el diagrama de cuerpo libre, se ejecutará varias veces el programa hasta obtener una convergencia en los valores de esfuerzo señalados por el mismo.

Finalmente, se comunicará el diagnóstico y se recomendará una solución confiable para evitar la repetición del evento.

3.2.4 Etapa IV: Análisis de resultados.

Se compararán las condiciones observadas en la actualidad en la operación del sistema de alivio en relación a las variables fundamentales del proceso y la actuación de los discos de ruptura, con respecto a lo especificado en normas y recomendaciones de los fabricantes. Se analizarán los resultados obtenidos en la etapa de evaluación y determinación. Se establecerán relaciones de causa – efecto entre las condiciones analizadas y su consecuencia sobre el fenómeno en estudio que es la falla prematura de los discos.



3.2.5 Etapa V: Conclusión.

Se establecerán conclusiones sobre el origen de la falla prematura de los discos de acuerdo a los resultados obtenidos, tanto en la etapa de evaluación, en la de determinación y análisis de resultados.



CAPÍTULO IV. DESARROLLO DEL TRABAJO.

4.1 PREPARANDO EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.

Para la aplicación del método de Análisis Causa Raíz, se realizó el primer paso que consistió en la preparación mediante el análisis cuantitativo del problema originado por la condición de falla a estudiar. Se generó la tabla que aparece reflejada en la Figura IV.1.

Preparando el Análisis Causa Raíz					
FUNCIÓN DESEADA	EVENTO	EVIDENCIA	Nº DE VECES	CONSECUENCIA	VALOR
RUPTURA DE LOS DISCOS EN CASO DE UN EVENTO DE FALLA DE LAS VÁLVULAS FV - 801 Y FV - 901 CORRESPONDIENTES A LAS ETAPAS 8 Y 9 DEL MECHURRIO B - 7351/B - 7352 O EN CASO DE UNA SOBREPRESIÓN EN EL SISTEMA. PARÁMETROS DE OPERACIÓN: PUNTO NOMINAL DE RUPTURA: 14,25 PSIG @ 72 °FRANGO DE RUPTURA: 13,25 - 15,25 PSIG.	FALLA PREMATURA OCURRIDA A PRESIONES MENORES DE 5 PSIG, SE ENCUENTRAN DISCOS APARENTEMENTE QUEMADOS.	EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DE LAS VÁLVULAS REPRESENTADO POR LA INSTALACIÓN EN BY - PASS DE LOS DISCOS DE RUPTURA SE ENCUENTRA BLOQUEADO, MEDIANTE LAS VÁLVULAS MANUALES INSTALADAS EN LA LÍNEA DE DICHO BY - PASS.	ESCENARIO OPTIMISTA NINGUNA O AL MENOS 1 VEZ POR AÑO EN CASO DE UN EVENTO DE SOBREPRESIÓN EN EL SISTEMA.	ESCENARIO OPTIMISTA PASE DE LOS GASES DE ALIVIO HACIA LOS QUEMADORES, PROVOCANDO EL ENCENDIDO DE LOS MISMOS.	PÉRDIDA ECONÓMICA 2 DISCOS X \$ 4500 = 9000 \$/AÑO.
			ESCENARIO MODERADO 2 A 3 VECES POR AÑO.	ESCENARIO MODERADO OCUPACIÓN DE ELEVADO NÚMERO DE HORAS HOMBRE DEL PERSONAL DE MANTENIMIENTO EN LAS OPERACIONES DE REPOSICIÓN.	PÉRDIDA ECONÓMICA \$ 18000/AÑO A \$ 27000/AÑO + HORAS HOMBRE/AÑO.
			ESCENARIO PESIMISTA 5 A 6 VECES POR AÑO, FALLA CONTINUA DE LOS DISCOS, POCO TIEMPO DESPUÉS DE HABER SIDO REEMPLAZADOS.	ESCENARIO PESIMISTA EVENTO DE FALLA DE LAS VÁLVULAS Y LOS DISCOS DE RUPTURA ESTÉN FUERA DE SERVICIO POR OPERACIONES DE REPOSICIÓN.	MONTO SUPERIOR A \$ 220000

Figura IV.1: Análisis cuantitativo de la situación problemática. Fuente PDVSA



Como segundo paso y con el propósito de comenzar a identificar las causas o la secuencia de sucesos que dan origen al evento no deseado de falla prematura de los discos de ruptura instalados en las etapas 8 y 9 del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, se construyó la Línea – Tiempo del equipo a estudiar. [15]

Durante la realización de esta actividad en la cual participó personal de los distintos departamentos involucrados, se pudieron conocer los siguientes detalles sobre la construcción y operación del equipo:

- ❖ Entre 1998 y 2002 se lleva a cabo la etapa de instalación del mechorrio B – 7352. En el proyecto preliminar se sugiere un diseño y se tiene la ingeniería. En el año 2002 se entrega una instalación inconclusa en la que no se observa coincidencia con el diseño original.
- ❖ Cuando se arranca el Mechorrio B – 7352, extensión del B – 7351, en junio del año 2003 como consecuencia de la contingencia ocasionada por un incendio ocurrido en este último que provocó su salida de servicio, se ajustan switches de las válvulas y se realiza una adecuación del sistema para el arranque en el B - 7352.
- ❖ Después de ajustar la instrumentación para el arranque, el Mechorrio B - 7352 operó en una contingencia por parada no deseada en FCC ya que el B – 7351 se encontraba fuera de servicio, ocasionando esto grandes daños en sus instalaciones específicamente en los pilotos, quemadores y muros de la fosa de quemado debido, ya que por condiciones de diseño, este equipo no debía operar durante tiempos muy prolongados.
- ❖ La falla prematura de los discos de ruptura comienza a reportarse a partir del año 2005 encontrándose que al momento del desmontaje de los mismos se observa que han sufrido exposición al fuego (ver Figura IV.1), sin embargo no existen informes, historiales o documentación sobre las operaciones de reposición. El personal de los distintos departamentos presente en la reunión en la cual se



llevó a cabo la construcción de la línea del tiempo del equipo, afirma que la última instalación de los discos se realizó en agosto del año 2006. Estos discos, igualmente fallaron y no fueron retirados, por lo que actualmente se encuentran bloqueados mediante las válvulas manuales ubicadas antes y después de los mismos en las tuberías en las que están instalados.



Figura IV.2: Evidencia de exposición de discos de ruptura al fuego. Fuente PDVSA

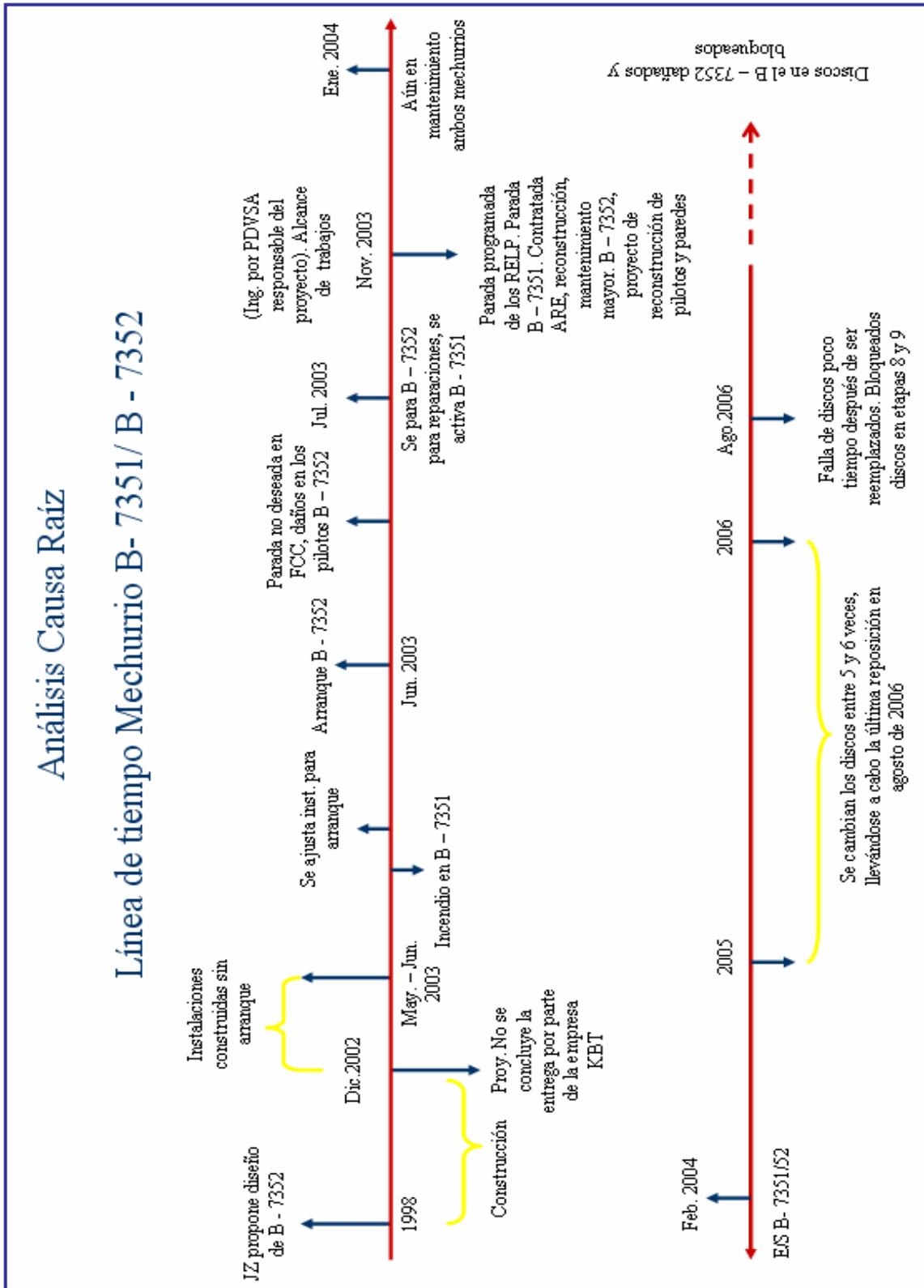


Figura IV.3: Línea de tiempo Sistema de Alivio B – 7351/ B – 7352. Fuente ACR PDVSA



Una vez identificados los eventos más significativos, entre ellos el inicio del período de falla de los discos del mechurrio B – 7351/ B – 7352 y conforme a la información obtenida de la Línea – Tiempo, se realizó el levantamiento de la información que se requería verificar para dar inicio a la construcción del Árbol Lógico de Falla. Los documentos a examinar se listan a continuación:

- ❖ Descripción del proceso de alivio de gases.
- ❖ Manual de operación y mantenimiento del mechurrio B – 7351/ B – 7352.
- ❖ Filosofía de diseño del mechurrio B – 7351/ B - 7352.
- ❖ Planos de instalaciones del mechurrio B – 7351/ B - 7352.
- ❖ Planos, especificaciones técnicas, órdenes de compra, certificados de calidad de los discos de ruptura.
- ❖ Notas de inspección, informes de mantenimiento de las instalaciones del B – 7351/ B - 7352 e informes de las operaciones de reposición de los discos de ruptura.

El siguiente paso consistió en la construcción del Árbol Lógico de Falla, a través del cual se visualiza el evento de falla en estudio en el primer nivel, se establecen los modos de falla en el segundo nivel y en el tercer nivel, se hipotetiza sobre cómo puede presentarse cada uno de estos modos, yendo de lo general a lo específico y utilizando lógica deductiva. [15]



El siguiente paso, lo constituye la verificación de las hipótesis del Árbol Lógico, de acuerdo a los modos de falla establecidos, para lo cual se presentan todas las actividades que se realizaron a fin de completar las matrices para cada una de las ramas. [15]

4.2 ESTUDIO DE LAS INSTALACIONES DEL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.

4.2.1 Consideraciones de John Zink Company para el diseño del mechurrio B – 7351/ B – 7352.

Al examinar los archivos presentes en la Planoteca de la Refinería El Palito relacionados con el mechurrio B – 7351/ B – 7352, específicamente el manual de operación y mantenimiento, fue posible constatar las condiciones bajo las que la empresa diseñadora propone una modificación del sistema B – 7351 en el año 1998, para lograr el aumento de su capacidad de 1 025 000 LBH a 1 775 000 LBH. A continuación se presentan los aspectos más relevantes encontrados a través de esta actividad perteneciente a la etapa de exploración de la investigación, en lo que respecta a filosofía de funcionamiento, bases del diseño y la utilización de los discos de ruptura.

❖ Filosofía de funcionamiento.

[6] Según la empresa diseñadora, el mechurrio B – 7351 sería modificado colocando estaciones de válvulas de control y discos de ruptura en las etapas 6 y 7B, para reemplazar la filosofía de control utilizada para la fecha, mediante sello de líquido. La etapa 7A sería aislada o sacada de servicio. Las etapas de la 1 a la 5 permanecerían como estaban y operarían en su secuencia original.



Con las primeras cinco etapas mantenidas en su condición original, la etapa 1 y la 1 redundante estarían permanentemente abiertas a la atmósfera para el alivio de flujos sin el proceso de apertura y cierre continuo de una válvula de control. Un sistema de purga continua sería provisto hacia estas etapas, para evitar la infiltración de oxígeno en los quemadores y en la tubería de distribución. La etapa 1 tendría una capacidad de alivio de aproximadamente 10 400 LBH cuando la presión en el manifold fuera de 10 psig. Al alcanzarse una presión en el manifold de 4,4 psig, la etapa 2 abriría para aliviar el flujo en exceso de la 1. Cuando la etapa 2 abre, la presión en el manifold decaerá a un valor que depende de la rata de flujo. Si la rata de flujo de alivio permite que la presión en el manifold decaiga hasta una presión de aproximadamente 1 psig, la etapa 2 cerrará. Por el contrario, si la rata de flujo es suficiente para mantener un incremento constante en la presión del manifold hasta 4,5 psig, abrirá la etapa 3. Esta secuencia se repetiría en todas las etapas del B – 7351, hasta la 7B en la cual la cantidad de flujo y la presión comenzarán a incrementarse hasta la capacidad hidráulica de 1 025 000 LBH al alcanzarse en el manifold un valor de presión de 9.8 psig.

Cuando el flujo de alivio excediera la capacidad de 1 025 000 LBH del B – 7351 (todas las etapas totalmente en servicio bajo esta condición), la presión aumentaría sobre 9,8 psig. Cuando dicha presión alcanzara un valor de 9,9 psig, la primera etapa del B – 7352, es decir la número 8 abriría. Si la presión continuara en incremento hasta un valor de de 10 psig, entonces abriría la etapa 9. La capacidad total del sistema B – 7351 en combinación con el B – 7352 sería de 1 775 000 LBH.

Al disminuir el flujo, cada etapa se desactiva o se cierra en orden inverso en el cual fueron activadas, desde la 9 hasta la 2.



A continuación se presenta una tabla con los valores de presión de apertura y cierre, bajo condiciones de diseño, de cada una de las etapas del sistema B – 7351/ B – 7352 (ver Tabla IV.1)

Tabla IV.1: Presiones de apertura y cierre de las etapas del mechorrio B – 7351/ B – 7352, según diseño propuesto para modificación y expansión

Nº de Etapa	Presión de apertura (PSIG @ manifold)	Presión de cierre (PSIG @ manifold)
B – 7351 - 1 + 1R	4,4	Siempre permanecen abiertas
B – 7351 - 2	4,5	1
B – 7351 - 3	4,6	1,1
B – 7351 - 4	4,7	1,5
B – 7351 - 5	4,8	1,6
B – 7351 - 6	4,9	2,2
B – 7351 – 7B	9,8	3,7
B – 7352 - 8	9,9	4,7
B – 7352 - 9	10	4,8

Fuente John Zink Company OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR El Palito Refinery Ground Flare B – 7351/ B – 7352

❖ Bases del diseño.

Durante la fase de diseño, la compañía responsable estableció que para que la expansión del sistema de alivio funcionara apropiadamente, sería necesaria la remoción del sello de agua y la instalación de estaciones de válvulas de control de flujo y discos de ruptura para las etapas 6 y 7B. Igualmente, estableció que



operar el sistema de alivio fuera de los límites de diseño o realizar alguna modificación, ajuste o cambio afectando los criterios de diseño sin el consentimiento por escrito de John Zink podría causar lesiones a personas u ocasionar daños sobre el equipo. [6]

❖ Consideraciones de John Zink sobre la utilización de discos de ruptura.

La empresa diseñadora del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352 consideró necesaria la colocación de discos de ruptura en el sistema de alivio para garantizar la protección del proceso en un evento de falla de las válvulas. Los discos de ruptura provistos debían ser exclusivos para la aplicación en el flare (mechurrio), para lo cual debían ser reordenados únicamente por el número de lote original, lo que aseguraría el reemplazo de discos equivalentes a los que serían colocados por primera vez en las instalaciones del flare. Esta consideración obedece a la condición de que una selección inapropiada de los discos de ruptura puede ser causa de ruptura prematura de los mismos o fallo de manera insegura.

La empresa diseñadora señala, en el documento examinado, que someter un disco a esfuerzos de tensión provocados por presiones oscilantes cercanas al valor de presión de ruptura reducirá la vida del mismo o provocará fallas a presiones menores que la presión de ruptura debido a la fatiga en los materiales de construcción.

De igual manera, se recomendó la confirmación de la integridad del disco periódicamente aplicando pruebas de fugas.

También se pudo conocer que cada disco de ruptura instalado en las etapas 6, 7B, 8 y 9, estaría equipado con un BDI (Burst Disk Indicator) o indicador de ruptura del disco. El indicador de ruptura del disco es un servicio simple que



consiste en la interrupción de la continuidad de un cable en el momento del estallido del disco, la cual es detectada en el panel de control. La instalación de este dispositivo es importante ya que cuando un disco de ruptura ha fallado, continuar la operación del sistema de alivio puede provocar retroceso de llamas en el camino de los quemadores y ocasionar daños en su sistema. Si necesariamente el sistema debía operarse con los discos rotos, el gas combustible debía ser suficiente para asegurar una llama estable y liberar el flujo en los quemadores de las etapas para prevenir el retroceso de llamas hacia los cabezales principales. [6]

4.2.2 Condiciones actuales de las instalaciones del mechorrio B – 7351/ B – 7352.

Mediante visitas realizadas al área de la planta refinadora de crudo donde se encuentran los sistemas de alivio de la misma, fue posible observar las instalaciones del mechorrio B – 7351/ B – 7352 y constatar la existencia de importantes diferencias entre el arreglo presente en campo y el diseño propuesto en el año 1998 por JZ COMPANY (ver Figuras IV.5 y IV.6).

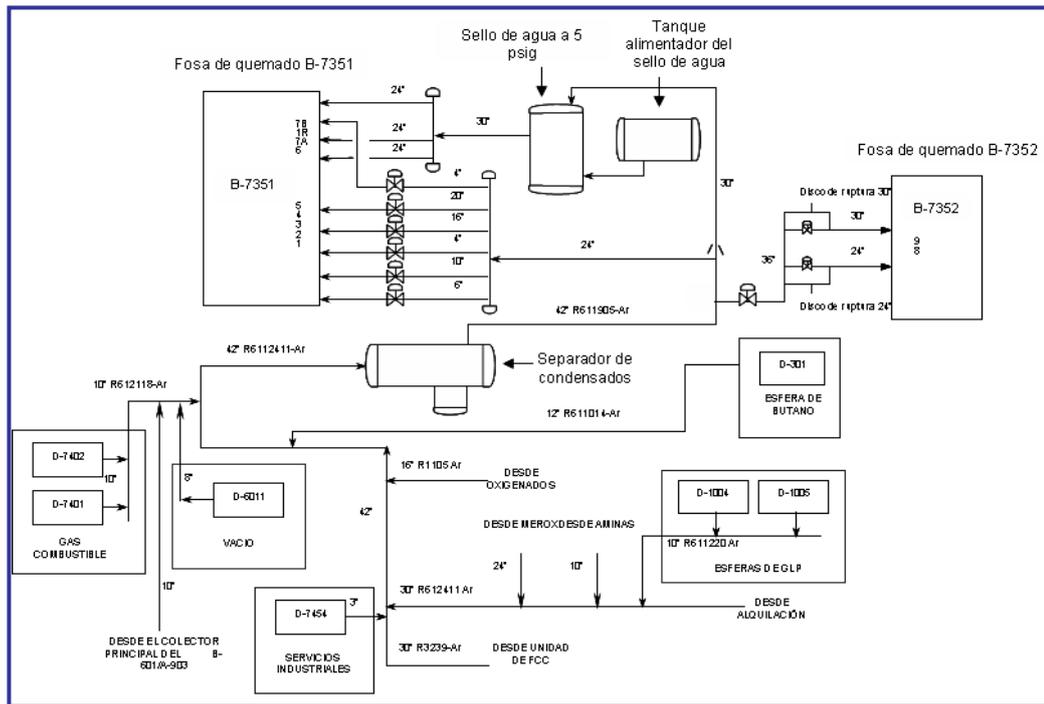


Figura IV.5: Instalaciones actuales del mechurrio B – 7351/ B – 7352. Fuente PDVSA

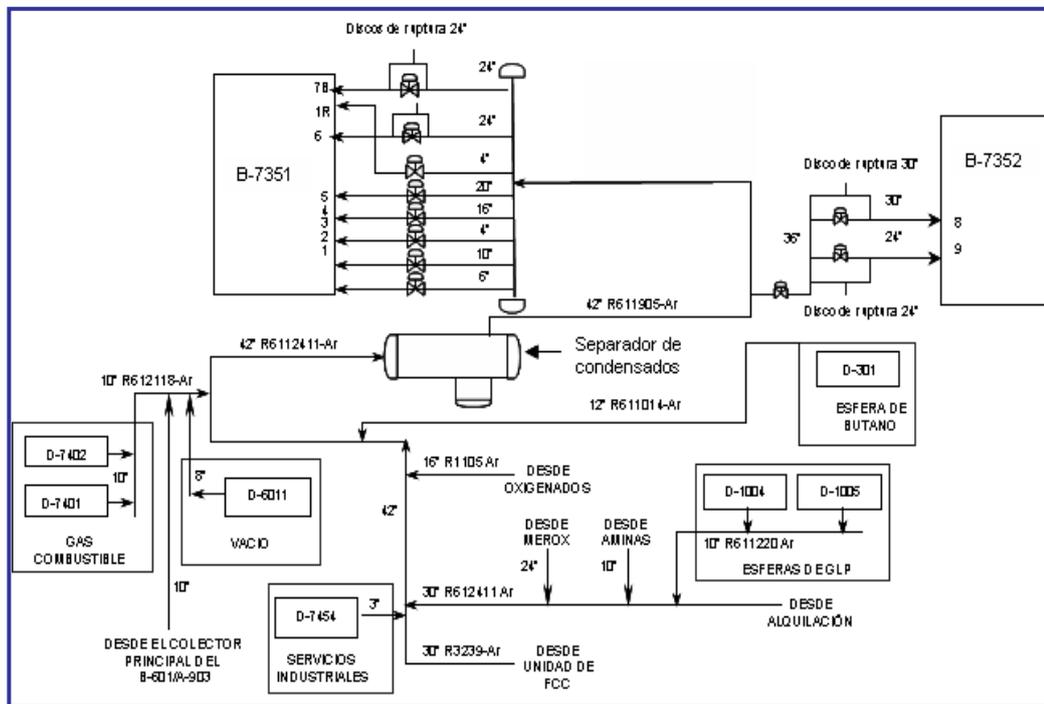


Figura IV.6: Diseño del mechurrio B – 7351/ B – 7352 propuesto por JZ COMPANY. Fuente PDVSA



Las presiones de operación de las etapas de acuerdo a las instalaciones que se encuentran en la actualidad, se muestran en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2: Presiones de apertura y cierre de las etapas del mechurrio B – 7351/ B – 7352, en el diseño instalado en sitio

Nº de Etapa	Presión de apertura (PSIG @ manifold)	Presión de cierre (PSIG @ manifold)
B – 7351 - 1 + 1R	Atmosférica	Siempre permanecen abiertas
B – 7351 - 2	1,5	1,4
B – 7351 - 3	1,6	1,55
B – 7351 - 4	1,8	1,7
B – 7351 - 5	2,5	2
B – 7351 - 6	4,5	< 2,45
B – 7351 – 7A	4,5	< 2,45
B – 7351 – 7B	4,5	< 2,45
B – 7352 - 8	9,1	7,6
B – 7352 - 9	9,9	9,4

Fuente Departamento de Automatización, Instrumentación y Tecnología

Igualmente, se pudo conocer mediante información aportada por personal del Departamento de Automatización, Instrumentación y Tecnología (AIT) durante las reuniones del Análisis Causa Raíz realizado por el personal de Ingeniería de Planta y Confiabilidad, que los dispositivos BDI (Burst Disk Indicador) actualmente no están instalados en las etapas 8 y 9 del B – 7352 y que éstos, a pesar de haberlo estado en determinado momento a lo largo del período de utilización del sistema de alivio en estudio, nunca fueron configurados en el panel



de control, por lo cual no se detectaría una ruptura de los discos mediante el servicio que éstos prestan.

4.3 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DE LOS DISCOS DE RUPTURA EN EL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.

4.3.1 Caracterización de los discos de ruptura que deben ser utilizados para las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B – 7352.

[2] Los discos de ruptura instalados en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B – 7352, son fabricados por la compañía Black Sivalls & Bryson Safety Systems (BS & B Safety Systems). El dimensionado de los discos se realizó durante la fase de diseño del mechurrio por John Zink Company, indicando en la hoja de especificaciones y certificados de compra y calidad, la instalación de discos de ruptura en las tuberías de 24 y 30 pulgadas (etapas 8 y 9) con las siguientes características (ver anexo C):

Tabla IV.3: Características de los discos de ruptura especificadas por John Zink Company

DISCO DE RUPTURA 24”		DISCO DE RUPTURA 30”	
Tipo	DVR	Tipo	DVR
Material	316 TEF 316	Material	316 TEF 316
Número de orden	A0002622 - 2	Número de orden	A0002622 – 4
Presión de ruptura	14,25 psig @ 72°F	Presión de ruptura	14,25 psig @ 72°F

Fuente John Zink Company OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR El Palito Refinery Ground Flare B – 7351/B – 7352



Como se observa en la Tabla IV.3, el tipo de disco de ruptura seleccionado es DVR, cada una de estas siglas obedece a una designación suministrada por el fabricante para definir las especificaciones del tipo de disco. A continuación se describen las características que representan cada una de ellas (ver anexo B).

Un disco de ruptura Tipo D del fabricante señalado, consiste en una sección superior metálica ranurada y una membrana de sello plástica o metálica colocada en el lado cóncavo o de presión de la sección superior, tienen forma abovedada y asiento angular (ver Figura IV.7). Dicha sección superior es la zona de presión que controla el rango de ruptura del disco. Desde que la sección superior abre a través de las ranuras, el sello la aísla del medio del proceso previniendo así las fugas. La presión es aplicada del lado cóncavo, enfrentando dicha cara a la carga de tensión. [2]



Figura IV. 7: Disco tipo D con asiento angular, formado por una sección superior de metal y sello plástico o metálico. Fuente Catálogo de BS & B Safety Systems

El material con el que está elaborado el sello en los discos tipo D es de espesor delgado y está sujeto a daños por contacto con sustancias externas o superficies irregulares en el asiento.



Un disco de ruptura Tipo DVR del fabricante señalado está compuesto por:

- ❖ Sección superior metálica y sello plástico o metálico con asiento angular.
- ❖ Aro o anillo metálico protector del sello.
- ❖ Soporte protector al vacío. [2]

4.3.2 Características de los discos de ruptura para reemplazo encontrados en el almacén.

Mediante visita realizada al almacén N° 2 de Área Q de PDVSA, fue posible observar las características de los discos que se instalan en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B – 7352.

En primer lugar se corroboró que los discos en existencia en el almacén fueran los destinados a la instalación en el mechurrio B - 7352, encontrándose cuatro discos de 24 pulgadas correspondientes a la etapa 8 del sistema de alivio. No se encontraron discos de 30 pulgadas (etapa 9). Los discos observados presentaron las siguientes características (ver anexo E):

Tabla IV.4: Características de los discos de ruptura de 24” destinados al reemplazo en el B – 7352

DISCO DE RUPTURA 24”	
Tipo	DV
Material	316 FEP 316
Número de orden	83007456 - 1
Presión de ruptura	9 psig @ 72°F

Fuente Tag de identificación de los discos presentes en el almacén



La imagen a continuación, ratifica la información suministrada en la Tabla IV.4.

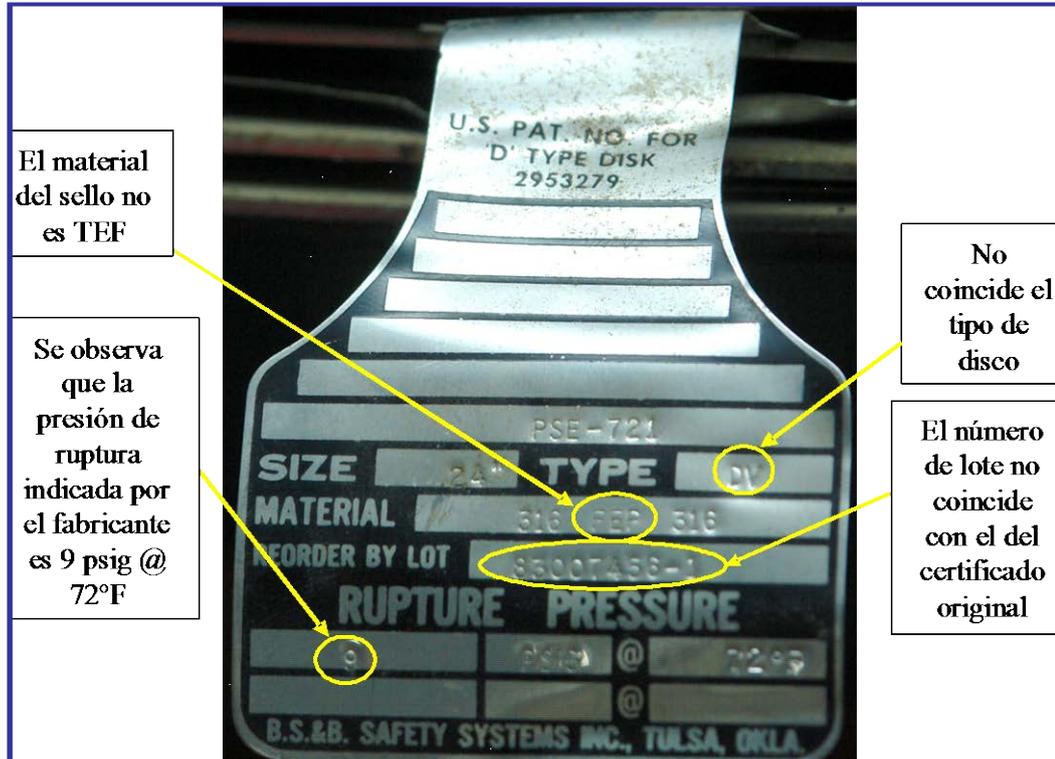


Figura IV. 10: Tag de identificación de los discos en existencia en el almacén. Fuente propia

4.3.3 Características de los discos de ruptura instalados en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7352.

Mediante inspección realizada en sitio, fue posible observar las características troqueladas en el tag de identificación del disco de ruptura de 24 pulgadas instalado en la etapa 8 del mechurrio B – 7352; no se observó la pestaña de identificación del disco de 30 pulgadas instalado en la etapa 9.

Las características observadas se presentan en la tabla a continuación (ver anexo E):



Tabla IV.5: Características del disco de 24” instalado en la etapa 8 del B – 7352

DISCO DE RUPTURA 24”	
Tipo	DV
Material	316 FEP 316
Número de orden	83007456 - 1
Presión de ruptura	9 psig @ 72°F

Fuente Tag de identificación del disco instalado en la etapa 8

A continuación se muestra la imagen que corrobora la instalación del disco con las características señaladas (ver Figura IV.11).



Figura IV.11: Tag de identificación del disco de ruptura instalado en la etapa 8. Fuente propia



Figura IV.12: Lugar en el que se encuentran instalados los discos de ruptura. Fuente propia

4.3.4 Especificaciones técnicas de las órdenes de compra de los discos de ruptura.

Mediante información suministrada por el personal responsable en almacén de recibir y ejecutar las órdenes de compra según las especificaciones técnicas provenientes de la refinera, se pudo conocer que en dichas órdenes, se indica textualmente, la adquisición de discos con la siguiente descripción:



Tabla IV.6: Especificaciones en SAP para compra de disco de ruptura de 24"

Descripción	Disco de ruptura
Material	Acero inoxidable 316
Aplicación	Válvulas de seguridad y alivio
Tamaño nominal	24 in
Presión de ruptura	10 PSIG
Fabricante y número de catálogo	Black Sivalls & Bryson
Temperatura de operación	281 °F

Fuente BARIVEN

Tabla IV.7: Especificaciones en SAP para compra de disco de ruptura de 30"

Descripción	Disco de ruptura
Tipo	DRV
Modelo	FA – 7R
Material	316 - TFE - 316
Aplicación	Válvulas de seguridad y alivio
Tamaño nominal	30 in
Presión de ruptura	14, 5 PSIG
Fabricante y número de catálogo	BS & B 1071214/QS – 0 – 0051 - 000
Temperatura de operación	72 °F

Fuente BARIVEN

También se pudo conocer que la orden de compra de los discos, en la que se cargaron las especificaciones señaladas en el sistema SAP del almacén N° 2 de Área Q, fue creada en la fecha 01/04/2004 (ver anexo E).



Por otra parte, con respecto a los discos encontrados en el almacén el personal a cargo señala que el sistema SAP no registra orden de compra para los cuatro (4) discos que actualmente se tienen allí dispuestos para su instalación en la etapa 8 del mechurrio B – 7352 por lo que resultaría engorroso determinar la fecha exacta de su ingreso en dicho almacén (ver anexo E). Asimismo, se aprecia que el código SAP que corresponde a los mismos no coincide con ninguno de los dos anteriores y al examinar su descripción se observó, textualmente, lo siguiente:

Tabla IV.8: Especificaciones en SAP de los discos de ruptura presentes en el almacén

Descripción	Disco de ruptura
Material	Acero inoxidable
Aplicación	Cabezales de seguridad
Tamaño nominal	24 in
Fabricante y número de catálogo	Fike Metal DV

Fuente BARIVEN

4.3.5 Especificaciones del fabricante BS&B Safety Systems para la instalación de discos de ruptura.

Junto a los discos, la empresa lista a través de catálogos y manuales, las especificaciones técnicas e instrucciones de instalación, así como las recomendaciones que deben tomarse en cuenta para realizar un montaje correcto y obtener una actuación óptima de los discos como dispositivos de alivio de presión (ver anexo D).

Antes de instalar los discos de ruptura, la empresa fabricante recomienda:

- ❖ Inspección del cabezal de seguridad o soporte del disco mediante:



- ✓ Examen visual de la superficie en búsqueda de la presencia de partículas foráneas, ya que arena o suciedad pueden dañar el disco de ruptura afectando su actuación o causando una fuga. Se debe limpiar si es necesario.
- ✓ El tamaño y grado del cabezal de seguridad debe coincidir con el tamaño de la brida compañera o de acople.
- ✓ Los discos de ruptura y soportes de seguridad no deben ser maquinados o modificados en ninguna forma excepto con la aprobación de BS & B. De no contar con esta aprobación, se anula la garantía del producto.

❖ Inspección del disco de seguridad.

- ✓ El disco de ruptura debe ser manejado cuidadosamente, por la pestaña o el borde. Se debe examinar el asiento y las superficies en búsqueda de abolladuras, marcas, rasguños o partículas que pueden dañar el disco, causar fugas o afectar la presión de ruptura. La instalación de un disco dañado puede resultar en un estallido prematuro del mismo. Cuando se han especificado soportes de vacío, éstos se unen permanentemente al lado cóncavo del disco.
- ✓ No se debe reinstalar un disco de ruptura que haya sido desmontado del cabezal de seguridad, incluso si éste no ha estallado. Esto se debe a que cuando las tensiones en el disco se liberan al desapernar el soporte de seguridad montado en la brida, la forma tomada por éste en el área del asiento puede dañar el sellado y afectar su actuación si el disco es reinstalado.
- ✓ Se debe tener en cuenta que la corrosión y las condiciones del proceso posiblemente afectan el disco causando en él deterioro, por lo que pueden necesitar reemplazos más frecuentes al obligatorio al momento del estallido.



La instalación del disco comprende el montaje del mismo en el cabezal o soporte de seguridad y luego este conjunto es el que debe colocarse en la tubería mediante su conexión en las bridas de acople.

Para instalar el disco de ruptura en el soporte de seguridad, los pasos a seguir son los siguientes (ver anexo D):

- ✓ Situar la entrada del cabezal de seguridad en una superficie de trabajo, en la posición y dirección del flujo indicadas en la imagen a continuación (ver Figura IV.13).



Figura IV.13: Instalación del disco de ruptura en el soporte de seguridad. Fuente Manual de instalación de BS & B Safety Systems

- ✓ Colocar el disco de ruptura nuevo en la entrada del soporte con la superficie abovedada hacia arriba. La presión del sistema debe estar enfrentada hacia el lado cóncavo del disco.
- ✓ Situar cuidadosamente la salida del cabezal de seguridad como se muestra en la Figura IV.13. El sentido del flujo en ambas caras del soporte debe seguir la misma dirección.



- ✓ Montar la unidad (disco y soporte) alineándolos con los tornillos de rosca. Los tornillos deben ser apretados solo lo suficiente como para mantener el disco ubicado cómodamente entre las dos partes del soporte.

Para instalar la unidad conformada por el disco y su respectivo soporte en el sistema de presión el fabricante especifica:

- ✓ Insertar la unidad disco – soporte entre las bridas de la tubería del sistema de presión, asegurándose de que el sentido del flujo corresponda con el sentido deseado de apertura o estallido del disco. La presión del sistema siempre debe estar enfrentada hacia el lado cóncavo del disco.
- ✓ Instalar las juntas entre la unidad y las bridas de la tubería (ver Figura IV.14). El fabricante recomienda empacaduras de fibra comprimida no mayores a 1/32 pulgadas para los discos tipo B y para los tipo D con sellos plásticos, metálicas de 1/8 pulgadas. Sin embargo, el usuario debe hacer las consideraciones necesarias para la elección de las empacaduras de acuerdo a las condiciones del servicio y la capacidad de las mismas para soportar cambios de temperaturas en el flujo.

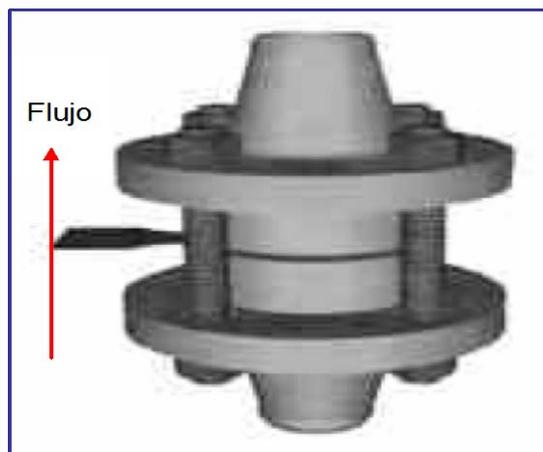


Figura IV.14: Instalación de la unidad disco – soporte en las bridas de la tubería. Fuente Manual de instalación de BS & B Safety Systems



- ✓ Instalar los pernos prisioneros con las tuercas. Los pernos y tuercas deben estar libres de juego y los hilos de la rosca deben estar ligeramente lubricados. Las tuercas se deben apretar firmemente de acuerdo a los valores recomendados en la Torque Table I del Bulletin 77 – 3001 Installation Instruction de BS & B Safety Systems en función del diámetro del disco. Aplicar el torque uniformemente en un patrón diagonal aplicando $\frac{1}{4}$ del valor recomendado para cada perno para pretensar. Luego repetir el patrón aplicando la magnitud del torque correspondiente a $\frac{3}{4}$ del valor recomendado (ver Figura IV.15).



TORQUE TABLE I
TYPE B OR D SERIES IN FA-7R AND BOLTED TYPE SAFETY HEAD ASSEMBLIES
 (Angular Seat, Light and Heavy Lip)**

SIZE	SAFETY HEAD RATING	TYPE D		TYPE B		
		METAL WITH PLASTIC SEALS TORQUE	ALL METAL CONSTRUCTION TORQUE	INCONEL, MONEL, HASTELLOY AND 316SS		NICKEL, ALUMINUM & DISKS WITH PLASTIC LINERS
IN.	ANSI	(FT-LB)	(FT-LB)	LIGHT (L) LIP	HEAVY (H) LIP	
1	150	7	14	25	25	7
	300	9	18	31	31	9
	600	9	18	31	31	9
1.5	150	10	20	30	30	10
	300	15	30	45	45	15
	600	15	30	45	45	15
2	150	36	50	50	50	36
	300	18	36	42	42	18
	600	18	36	42	42	18
3	150	49	80	80	80	49
	300	29	58	69	69	29
	600	29	58	69	69	29
4	150	24	48	48	48	24
	300	29	58	95	95	29
	600	33	66	153	153	33
6	150	45	90	90	-	45
	300	30	60	104	-	30
	600	40	80	139	-	40
8	150	82	125	125	-	82
	300	64	128	153	-	64
	600	82	164	262	-	82
10	150	81	153	153	-	81
	300	69	138	185	-	69
	600	95	190	*	-	95
12	150	95	145	145	-	95
	300	90	200	250	-	90
	600	80	160	*	-	80
14	150	120	230	230	-	120
	300	80	180	*	-	80
	600	105	210	230	-	105
16	150	105	210	255	-	105
	300	105	210	255	-	105
	600	130	260	280	-	130
18	150	130	260	280	-	130
	300	95	190	270	-	95
	600	115	226	350	-	115
20	150	115	226	350	-	115
	300	105	210	320	-	105
	600	150	300	465	*	150
24	150	150	300	465	*	150
	300	150	300	465	*	150
	600	135	270	420	*	135
***30	150	135	270	420	*	135
	300	190	380	590	*	190
	600	165	330	480	*	165
***36	150	165	330	480	*	165
	300	220	440	700	*	220
	600	225	450	560	-	225
***44	150	225	450	560	-	225
	300	330	660	815	-	330

SIZE	SAFETY HEAD RATING	TYPE D		TYPE B		
		METAL WITH PLASTIC SEALS TORQUE	ALL METAL CONSTRUCTION TORQUE	INCONEL, MONEL, HASTELLOY AND 316 SS		NICKEL, ALUMINUM, & DISKS WITH PLASTIC LINERS
MM	DIN	(NT-M)	(NT-M)	LIGHT (L) LIP	HEAVY (H) LIP	
25	10	10	19	32	32	10
	16					
	25					
	40					
40	10	17	34	50	50	17
	16					
	25					
	40					
50	10	49	75	75	75	49
	16					
	25					
	40					
80	10	33	67	79	79	33
	16					
	25					
	40					
100	10	32	65	65	65	32
	16					
	25					
	40					
150	10	64	128	152	-	64
	16					
	25					
	40					
200	10	77	154	266	-	77
	16					
	25					
	40					
250	10	117	135	135	-	117
	16					
	25					
	40					
300	10	94	188	263	-	94
	16					
	25					
	40					
350	10	106	210	335	-	106
	16					
	25					
	40					
400	10	99	152	152	-	99
	16					
	25					
	40					
450	10	118	236	263	-	118
	16					
	25					
	40					
500	10	133	266	390	-	133
	16					
	25					
	40					
550	10	148	296	440	-	148
	16					
	25					
	40					
600	10	120	160	160	-	120
	16					
	25					
	40					
650	10	135	215	215	-	135
	16					
	25					
	40					
700	10	115	230	320	-	115
	16					
	25					
	40					
750	10	130	255	350	-	130
	16					
	25					
	40					
800	10	100	150	150	-	100
	16					
	25					
	40					
850	10	120	235	260	-	120
	16					
	25					
	40					
900	10	145	290	375	-	145
	16					
	25					
	40					
950	10	160	320	410	-	160
	16					
	25					
	40					
1000	10	135	270	270	-	135
	16					
	25					
	40					
1050	10	150	300	365	-	150
	16					
	25					
	40					
1100	10	185	370	450	-	185
	16					
	25					
	40					
1150	10	200	400	490	-	200
	16					
	25					
	40					
1200	10	130	260	260	-	130
	16					
	25					
	40					
1250	10	160	320	420	-	160
	16					
	25					
	40					
1300	10	180	360	560	-	180
	16					
	25					
	40					
1350	10	210	420	660	-	210
	16					
	25					
	40					
1400	10	175	350	390	*	175
	16					
	25					
	40					
1450	10	210	420	580	*	210
	16					
	25					
	40					
1500	10	230	460	720	*	230
	16					
	25					
	40					
1550	10	200	400	580	*	200
	16					
	25					
	40					
1600	10	240	480	700	*	240
	16					
	25					
	40					
1650	10	300	600	800	*	300
	16					
	25					
	40					

Figura IV.15: Valores de torque recomendados por BS & B Safety Systems para la instalación de discos de ruptura tipo B o D. Fuente BS & B Safety Systems



- ✓ Inspeccionar y corroborar que las bridas de las tuberías están en buen estado. Usar galgas si es necesario para asegurar el espaciamiento uniforme en toda el área de la brida. No sobre ajustar. Las superficies de asiento angulares ayudan a sellar el disco con carga mínima en el perno. El ajuste excesivo puede dañar los discos de ruptura.
- ✓ El valor del esfuerzo de torsión en las tuercas de las bridas se debe verificar periódicamente a la temperatura de servicio del sistema. [1]

4.3.6 Condiciones de instalación de los discos en las tuberías correspondientes a las etapas 8 y 9 del mechorrio B – 7351/ B – 7352.

Mediante entrevista realizada al personal PDVSA responsable del montaje de los discos de ruptura, se pudo conocer que a lo largo de la vida del mechorrio B – 7352, los discos de repuesto habían sido instalados sin seguir ninguna recomendación específica en cuanto al procedimiento de instalación o a los valores de torque a aplicar entre los pernos y tuercas que sujetan las bridas de las tuberías correspondientes a las etapas 8 y 9 del sistema de alivio.

En vista de la frecuente ocurrencia del evento de falla prematura de los discos de ruptura, el personal técnico a cargo de supervisar el montaje de los mismos, realizó una consulta a los representantes en Venezuela de la empresa que realizó el diseño del sistema de alivio, quienes indicaron aplicar los valores de torque recomendados en la Torque Table I del Bulletin 77 – 3001 Installation Instruction del fabricante de los discos, según la cual el torque a aplicar para el disco de 24 pulgadas es de 150 ft - lb, mientras que para el de 30 pulgadas es 135 ft - lb (ver Figura IV.15). También se pudo conocer mediante esta entrevista, que dichas recomendaciones fueron tomadas en cuenta para el último reemplazo de los discos efectuado en la fecha 08/08/2006 y que en procedimientos de reemplazo anteriores a esta fecha, los discos habían sido colocados en posición opuesta a la



que especifica el fabricante, es decir, con el lado convexo enfrentado a la presión (ver Figura IV.16).

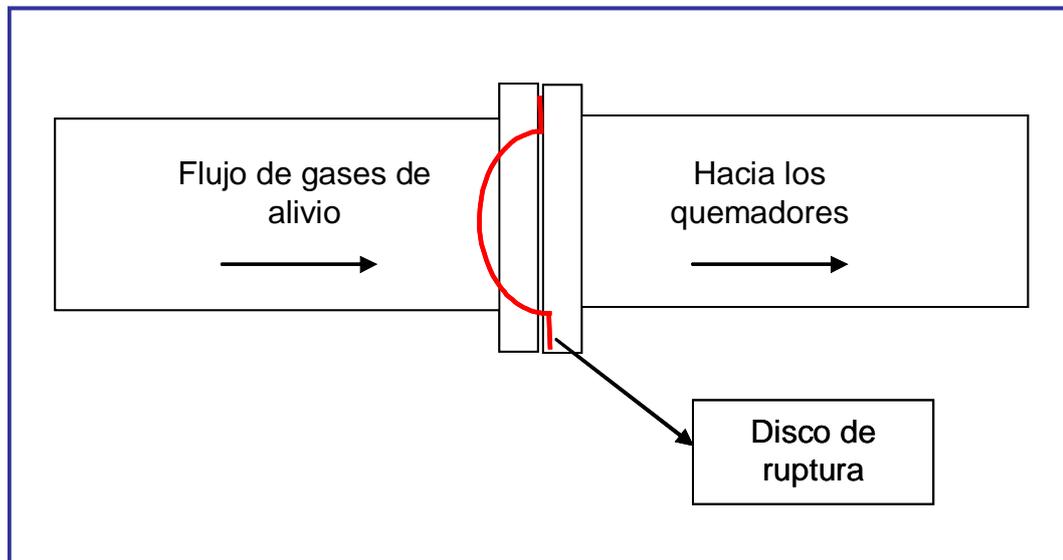


Figura IV.16: Esquema de colocación incorrecta de discos de ruptura. Fuente propia

Este hecho, igualmente fue consultado al personal de la empresa representante de la compañía diseñadora del mechorrio, quienes contactaron con el Departamento de Estructural de la compañía fabricante de los discos de ruptura los cuales indicaron que éstos están diseñados para operar soportando cargas por compresión sobre la sección cóncava, al colocarse de forma opuesta, la cara convexa es la que sufre toda la carga de presión del gas, generando así cargas por elongación y no por compresión sobre la cara cóncava. Al colocar el disco en posición contraria a la que fue diseñado, cualquier variación de la presión provocará una elongación y como el material y el diseño no son adecuados para soportar este tipo de esfuerzos, el disco se abombará con facilidad. Al observar imágenes de los discos de ruptura, éstos poseen unos cortes y grapas que actúan como concentradores de esfuerzo, facilitando la ruptura del mismo. Con los discos expuestos a una elongación, dichos cortes son los primeros que ceden y no serán



necesarias las grapas para provocar la ruptura, ya que el material va a ceder con mayor facilidad. Según la compañía fabricante de los discos, no se puede establecer o especificar una presión de estallido si éste se coloca de manera errónea, es decir, no se puede predecir bajo qué valor de presión cederá el disco, lo que si se puede asegurar es que la ruptura puede suceder a cualquier presión por debajo de la presión de ruptura de diseño, es decir, entre 1 psig y 14,25 psig.

Por otra parte, el procedimiento de instalación ejecutado para la fecha 08/08/2006 indicado en la entrevista fue el siguiente:

- ❖ Se colocaron los discos de 24 y 30 pulgadas en sus respectivos soportes.
- ❖ Se colocaron los soportes en la bridas de las tuberías para su ajuste.
- ❖ Se alinearon los pernos y tuercas, se ajustaron siguiendo un patrón diagonal y utilizando una llave de torque (torquímetro) mediante la cual se prefijaron los valores recomendados para cada diámetro, 150 ft - lb y 135 ft - lb para los discos instalados en las tuberías de 24 y 30 pulgadas respectivamente.

El procedimiento de instalación del disco de ruptura no se limita a la colocación dentro del soporte y posterior ajuste en la tubería, igualmente comprende un proceso de inspección de las condiciones previas a la instalación ya que estos dispositivos son delicados, por lo que el fabricante recomienda los pasos explicados anteriormente. A pesar de esto, las imágenes a continuación corresponden a un disco de ruptura antes de su instalación en uno de los reemplazos realizados durante el año 2006.

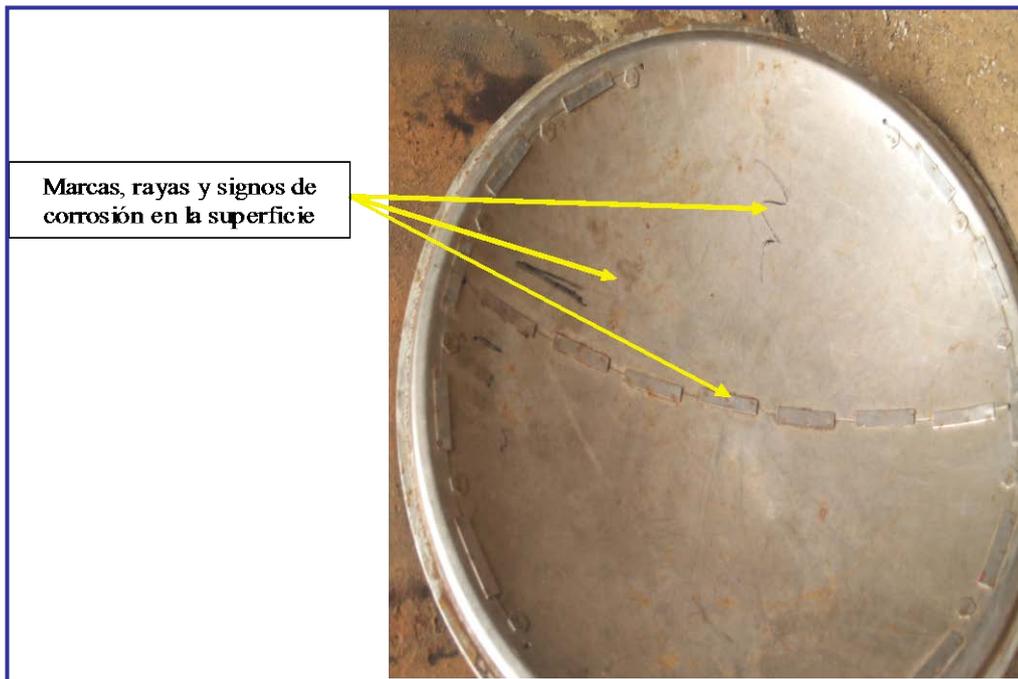


Figura IV.17: Condición de un disco de ruptura antes de su instalación. Fuente PDVSA



Figura IV.18: Evidencia de corrosión en borde del disco de ruptura. Fuente PDVSA



4.3.7 Instrucciones de los fabricantes de discos de ruptura para su almacenaje.

- ❖ Cuando se deba proceder al almacenamiento de discos de ruptura por cualquier período antes de su instalación, dicho almacenamiento debe efectuarse en el embalaje original.
- ❖ Las cajas deben depositarse en estanterías en un área limpia y seca. De este modo se prevendrán daños accidentales.
- ❖ Debe considerarse que los discos de ruptura tienen un tiempo de vida limitado en el almacén.
- ❖ Todos los discos de ruptura están dotados de una etiqueta de identificación que contiene los datos de presión y temperatura nominales. Estos datos deben corroborarse con referencia a los requisitos de aplicación para asegurar una instalación segura y satisfactoria. [7] [17]

4.3.8 Condiciones de almacenaje y características de los discos de ruptura que se instalan en las etapas 8 y 9 del mecurrio B – 7351/ B – 7352.

Mediante la visita realizada al almacén N° 2 de Área Q de PDVSA, fue posible inspeccionar las condiciones de almacenaje de los discos que se instalan en las etapas 8 y 9 del mecurrio B – 7351/ B – 7352.

Durante la inspección se observó lo siguiente:

- ❖ Los discos se encuentran colocados directamente en el estante sin el debido embalaje original (ver Figura IV.19), el cual consta de un recubrimiento de espuma sintética y una caja de madera. Se observa que los discos están expuestos a polución y al medio ambiente, es importante acotar que la ubicación del almacén es considerada un área de un ambiente agresivo tipo industrial y marítimo.

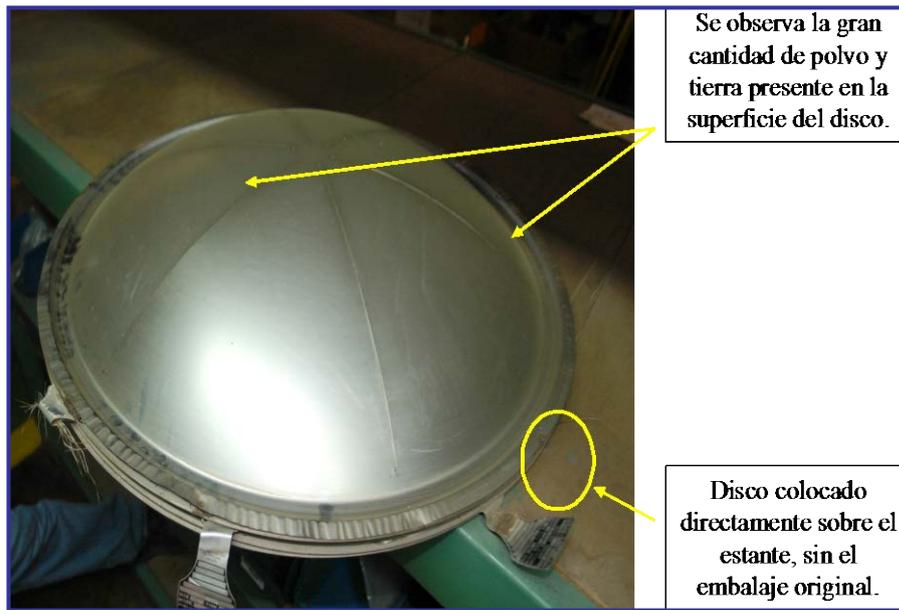


Figura IV.19: Condiciones de almacenamiento de los cuatro discos presentes en el Galpón N° 2 de Área Q. Fuente propia

❖ Los discos presentan signos de corrosión en la superficie y en los bordes (ver Figura IV.20).

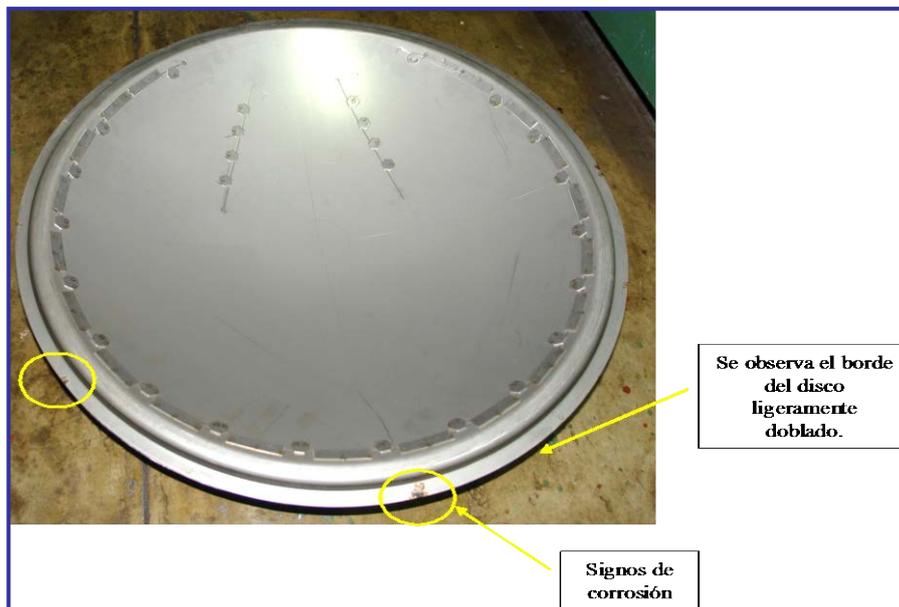


Figura IV.20. Corrosión en la superficie de los discos y bordes en mal estado. Fuente propia



- ❖ Los discos se encuentran apilados uno sobre otro, generando aplastamiento entre ellos y a la pestaña que contiene el tag o pestaña de identificación con los datos del fabricante (ver Figura IV.21).

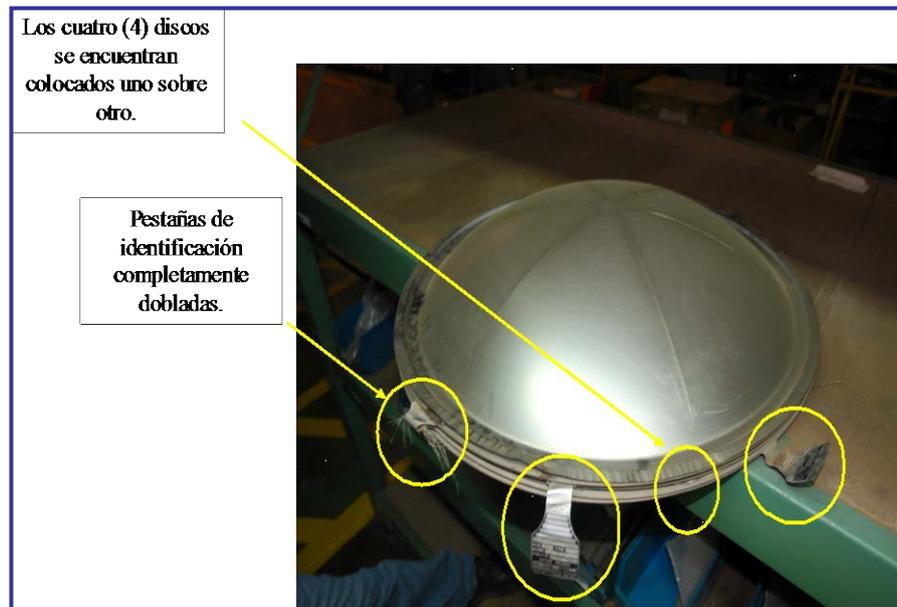


Figura IV.21: Consecuencias del almacenaje indebido de los discos. Fuente propia

4.4 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS ACTUALES DEL SISTEMA DE ALIVIO B – 7351/ B – 7352.

4.4.1 Consideraciones para el estudio de las condiciones operacionales del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352.

El estudio y evaluación de las condiciones operacionales actuales del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352 comprende la medición de las variables fundamentales del proceso como son la presión y la temperatura. Igualmente, y a partir de los valores obtenidos de las mediciones directas de las variables fundamentales, deben ser determinados los caudales que circulan a través del



arreglo para obtener la velocidad y el régimen en el que los gases de alivio fluyen hacia los quemadores.

Para realizar las mediciones de las variables señaladas, se utilizó la instrumentación instalada en sitio, en tres puntos que se describen y luego se muestran en la Figura IV.22. La utilización de estos puntos obedeció a la dificultad de instalación de instrumentos en otros lugares del arreglo de tuberías, debido a que el Mechurrio se encuentra constantemente en operación. Teniendo en cuenta que el fluido que circula a través del mismo es inflamable, la instalación de instrumentos en puntos distintos a los de las tomas existentes, requería la creación de las mismas y por ende la puesta fuera de servicio del sistema de alivio. Cabe destacar que la información obtenida en estos puntos permitió la realización de los cálculos necesarios que se muestran más adelante.

- ❖ Toma de presión y toma de temperatura ubicadas en el cabezal de 42”, justo a la entrada de los gases al tambor separador de condensados: En este punto se encuentra instalado un manómetro indicador de presión local y una termocupla (ver Figura IV.22).
- ❖ Toma de presión y de temperatura ubicada en el manifold de 24”, justo a la entrada de los gases hacia las etapas 1, 1R, 2, 3, 4 y 5, del sistema de alivio en estudio, se encuentran en servicio un indicador – transmisor de presión (indicación en campo y en consola del área de Servicios Industriales) y una termocupla (ver Figura IV.22).
- ❖ Toma de presión ubicada en el manifold de 36”, a la entrada de los gases de alivio hacia las etapas 8 y 9 del mechurrio (ver Figura IV.22).

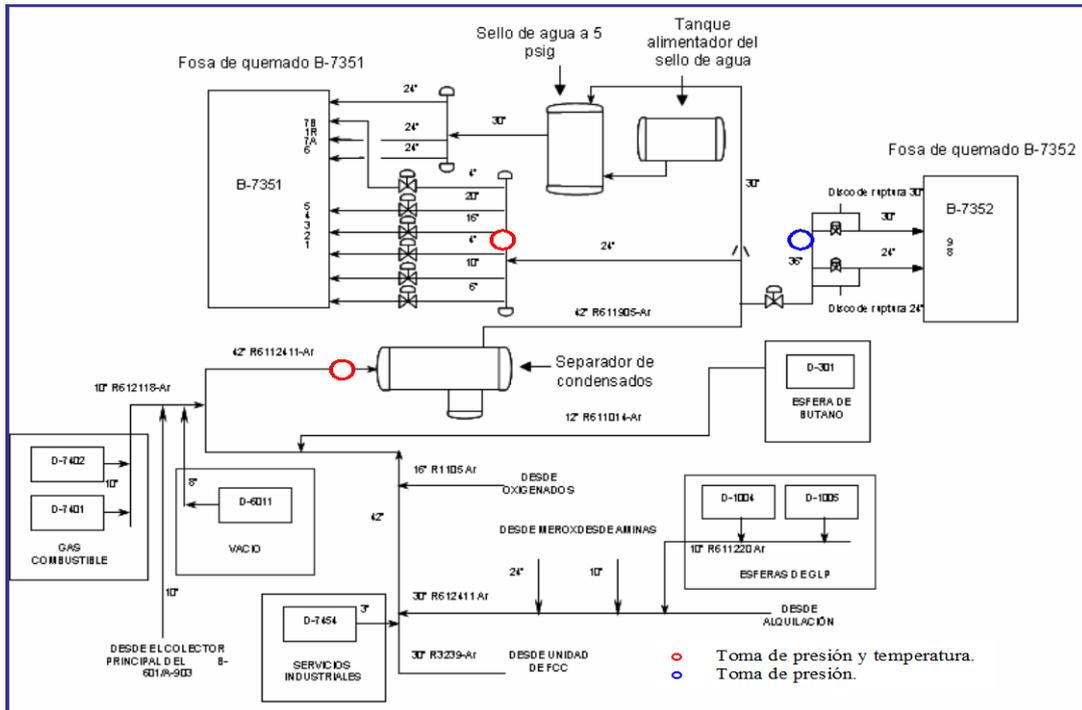


Figura IV.22: Puntos considerados para la medición de las variables fundamentales del proceso de alivio de gases. Fuente PDVSA

Los resultados de las mediciones efectuadas en los puntos señalados se muestran en las tablas a continuación:

Tabla IV. 9: Valores de presión y temperatura en el cabezal de 42” indicados por los instrumentos a la entrada del tambor separador D – 7351.

N° Medición	Presión (psig) (KPa)	Temperatura (°C)
1	1,5 (10342,14)	32
2	1,5 (10342,14)	32
3	1,6 (11031,61)	32
4	1,6 (11031,61)	32
5	1,6 (11031,61)	30

Fuente propia.



Tabla IV. 10: Valores de presión y temperatura indicados por los instrumentos en el manifold de 24" del B – 7351 y en la consola del área de Servicios Industriales.

N° Medición	Presión Campo (psig) (Kpa)	Presión Consola (psig) (KPa)	Temperatura (°F) (°C)
1	1,2 (8273,71)	1,2 (8273,71)	100 (37,78)
2	1,4 (9622,56)	1,4 (9622,56)	100 (37,78)
3	1,5 (10342,14)	1,5 (10342,14)	100 (37,78)
4	1,48 (10204,24)	1,48 (10204,24)	98 (36,67)
5	1,42 (9790,56)	1,42 (9790,56)	100 (37,78)

Fuente propia.

Tabla IV. 11: Valores de presión indicados por el medidor instalado en el manifold de 36" del B – 7352.

N° Medición	Presión (psig) (KPa)
1	1,3 (8963,18)
2	1,4 (9622,56)
3	1,3 (8963,18)
4	1,3 (8963,18)
5	1,3 (8963,18)

Fuente propia.

Con los datos obtenidos de las mediciones de las variables del proceso, se han construido los siguientes diagramas para visualizar el comportamiento de la presión y la temperatura en cada uno de los puntos señalados en la Figura IV.22.

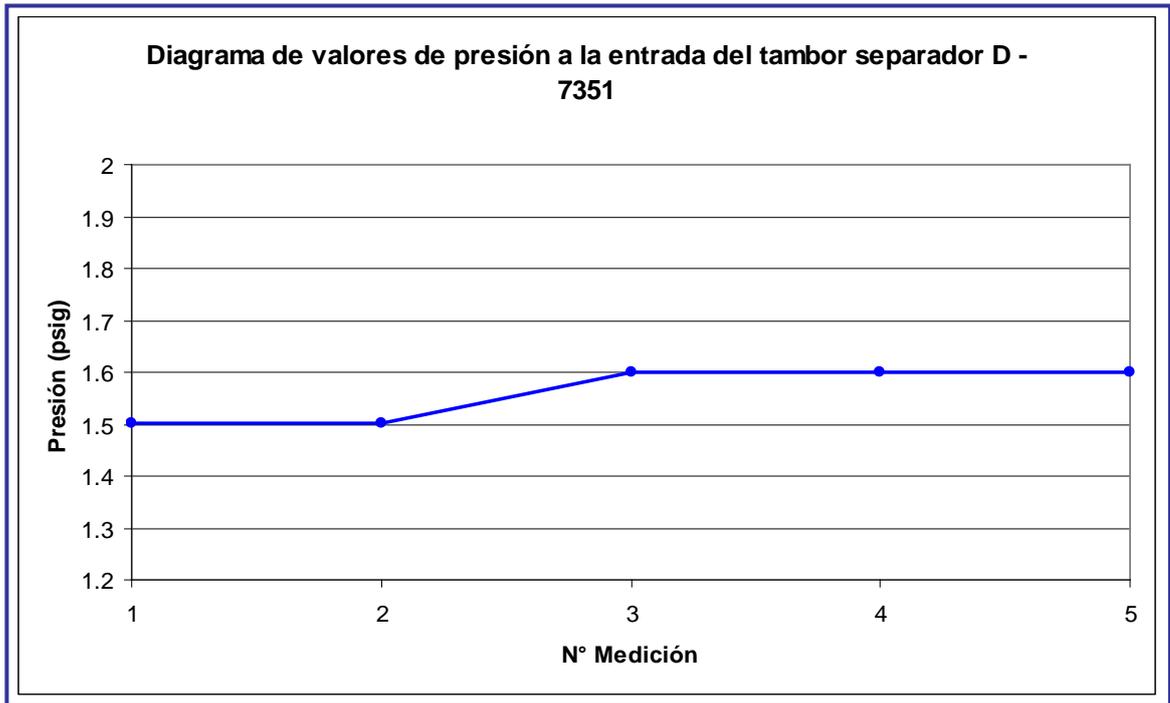


Figura IV.23: Diagrama de valores de presión a la entrada del tambor separador D – 7351. Fuente propia

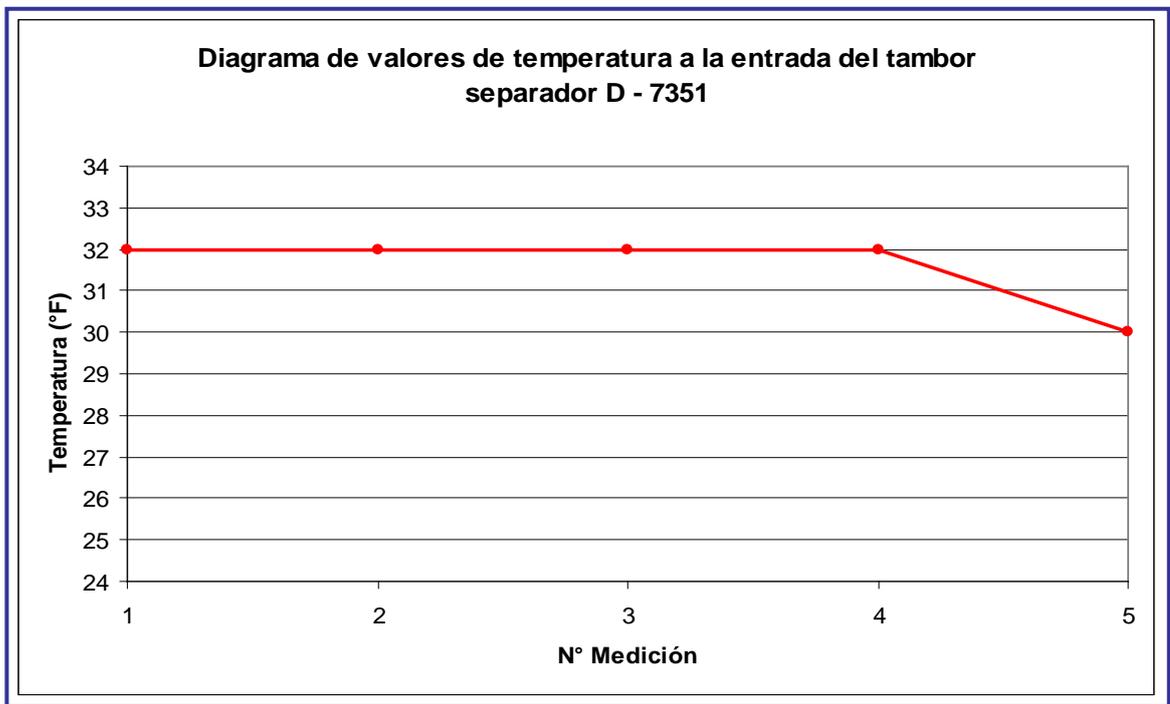


Figura IV.24: Diagrama de valores de temperatura la entrada del tambor separador D – 7351. Fuente propia

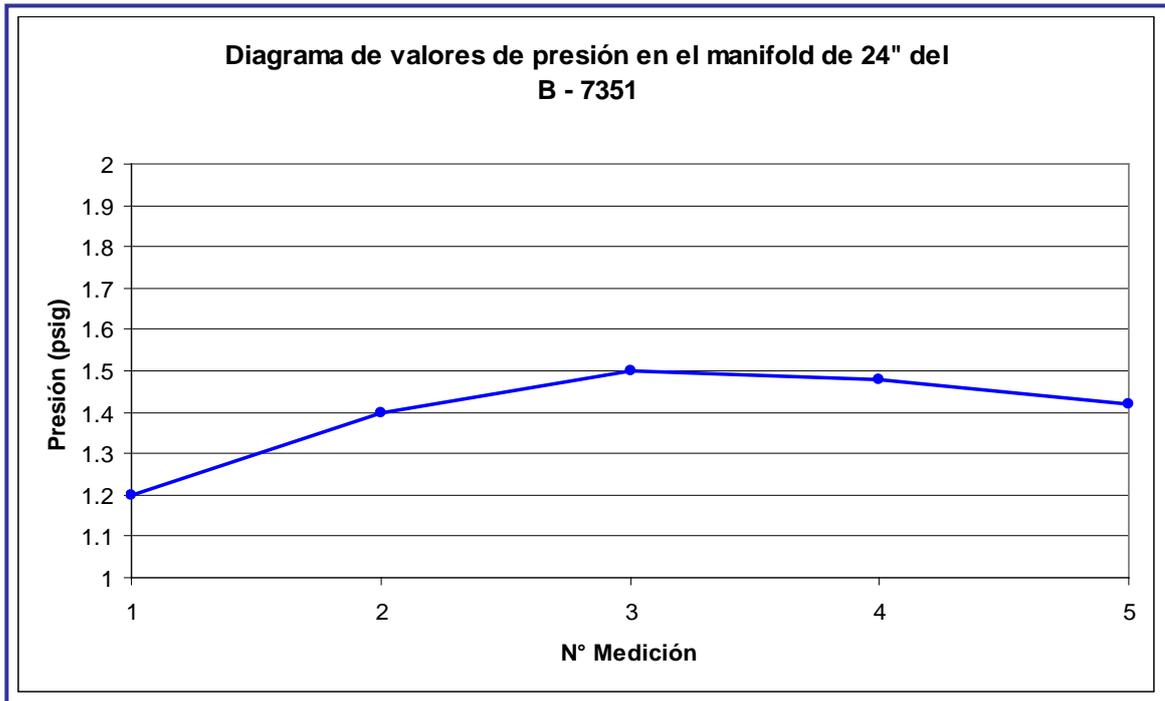


Figura IV.25: Diagrama de valores de presión en el manifold de 24" del B – 7351. Fuente propia

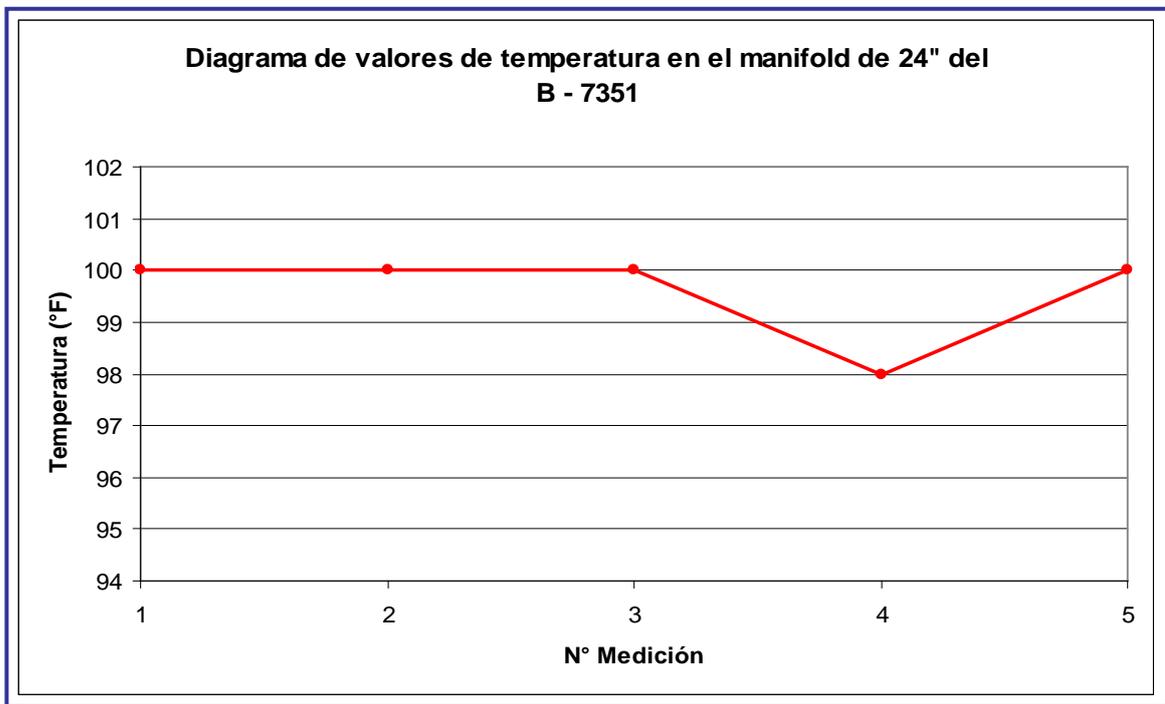


Figura IV.26: Diagrama de valores de temperatura en el manifold de 24" del B – 7351. Fuente propia

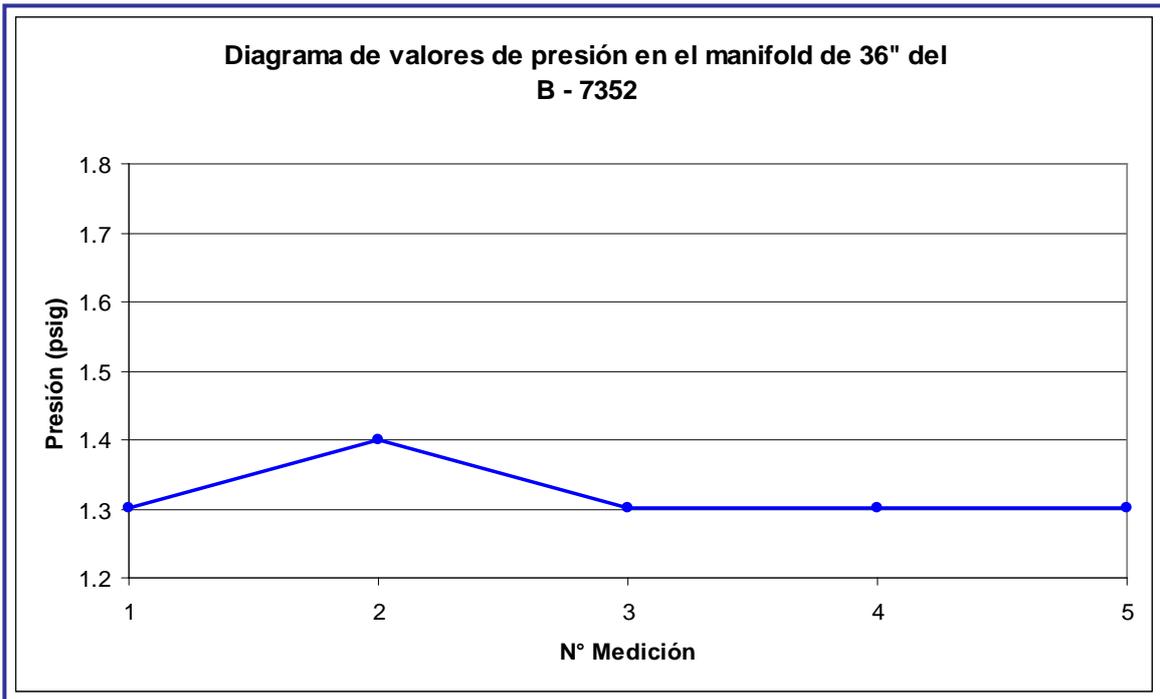


Figura IV.27: Diagrama de valores de presión en el manifold de 36" del B – 7352. Fuente propia

4.4.2 Consideraciones para realizar la evaluación hidráulica del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352.

❖ Consideraciones sobre el fluido.

Como se describió al principio de este trabajo especial de grado, el mechorrio B – 7351/ B – 7352, es un sistema de alivio de presiones de los equipos que operan en varias unidades de la planta de la Refinería El Palito, ellas son: FCC (Craqueo Catalítico Fluidizado), Oxigenados, Vacío, Alquilación, Gas Combustible, Servicios Industriales, Merox y Aguas Agrias así como las esferas de Gas Licuado de Petróleo (LPG) y Butano. Bajo estas condiciones, efectivamente, el flujo que se desplaza por el arreglo de tuberías hacia las fosas de quemado del sistema de alivio es una mezcla de gases reales cuya composición se pudo conocer al examinar los documentos de ingeniería del proyecto de



ampliación del sistema de alivio B – 7351, en los cuales se observó que dicha mezcla está conformada por una cantidad superior a 40 gases asociados al proceso de refinación del crudo, entre ellos: Metano (C_1), etano (C_2), propano (C_3), isobutano (IC_4), metanol, TAME, ácido tartárico (TAA), ácido sulfídrico (H_2S) y muchos más. Sin embargo, solo algunos se encuentran presentes en una fracción molar que pueda considerarse representativa para la mezcla, por lo cual y bajo recomendación del personal del Departamento de Procesos de la empresa, únicamente se tomaron en cuenta los que cumplieran con esta condición para la estimación de las propiedades del fluido (ver Tabla IV.12). [6]

Tabla IV.12: Componentes de la mezcla de gases.

Componente	Fracción Molar (%)
Isobutano	23,25
H_2S	16,6
Butano	6,82
MTBE	5,29
Isobuteno	5,16
TAME	4,96
Metanol	3,70
Trans2 Buteno	3,40

Fuente INELECTRA, ingeniería de detalle adecuación sistemas de alivio Refinería El Palito.

El resto de los gases que componen la mezcla, se encuentran en fracciones molares con valores menores al 1%.

Para determinar las propiedades de esta mezcla de gases se realizó, con el apoyo del Departamento de Procesos de la Refinería El Palito, la simulación de



una corriente de flujo de la mezcla de gases mediante la utilización del software PRO II de SimSci – Esscor Invensys manejado por los ingenieros del mismo departamento.

Para llevar a cabo la simulación mediante el software, se deben definir algunos datos como entradas. En primer lugar, especificar el proceso que se desea simular, en el caso de esta investigación, la entrada de una corriente de flujo de una mezcla de gases a un tambor separador de fases. Luego, se introduce la información de la corriente, como son el tipo de corriente definido por los datos que se tienen sobre la misma (ver Figura IV.28) y las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentra dicha corriente antes de llevarse a cabo el proceso de separación en fase vapor y condensado (ver Tabla IV.13).

The image shows a screenshot of the 'PRO/II - Stream Data' dialog box. The dialog has a title bar 'PRO/II - Stream Data' and a menu bar with 'UOM', 'Range', 'Help', 'Tag', 'Overview', 'Status', and 'Notes'. The 'Stream' field contains 'S1' and the 'Description' field is empty. The 'To Unit' is 'F1'. Under 'Stream Type', 'Composition Defined' is selected in a list box. To the right are buttons for 'Flowrate and Composition...', 'Stream Solids Data...', and 'Stream Polymer Data...'. The 'Thermal Condition' section has 'First Specification' set to 'Temperature' with a value of '89.60 F' and 'Second Specification' set to 'Pressure' with a value of '16.200 psia'. The 'Thermodynamic System' is set to 'Default (SRK01)'. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura IV.28: Introducción de los datos de la corriente en el software de simulación de procesos PRO II. Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II



Tabla IV.13: Condiciones de la mezcla de gases a la entrada del tambor separador D – 7351.

Condiciones	Valor
Temperatura	89,6 °F (32 °C)
Presión	16,2 psia (111,7 KPa)

Fuente propia.

Posteriormente, se definen los componentes de la mezcla y la fracción molar dentro de cada uno de ellos. Como solo se utilizaron algunos gases de la mezcla, al sumar las fracciones molares no se obtiene un 100% por lo que el programa presenta una opción para normalizar las proporciones.

Una vez definidos los componentes de la mezcla, se seleccionan los métodos y sistemas termodinámicos que utilizará el programa para realizar el cálculo (ver Figura IV.29). Se seleccionó como método termodinámico el Soave – Redlich – Kwong.

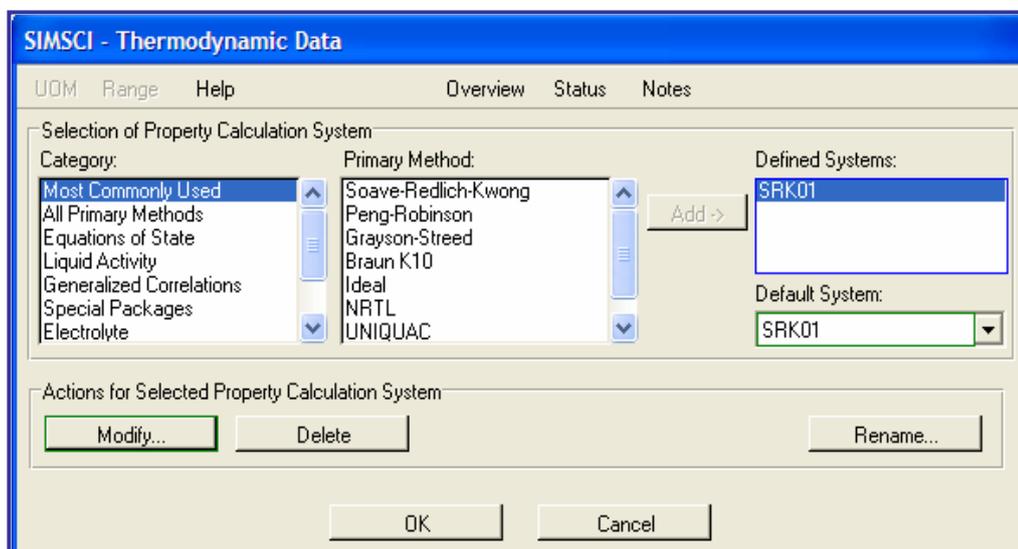


Figura IV.29: Selección de los métodos de cálculo en el software de simulación de procesos PRO II. Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II



Finalmente, el programa realiza la evaluación y muestra los resultados en la siguiente ventana (ver Figura IV.30). Se observan los valores de las propiedades de la corriente de mezcla S1 a la entrada del tambor separador, así como de cada una de las corrientes que salen de él, la de vapor identificada como S2 y la de líquido S3.

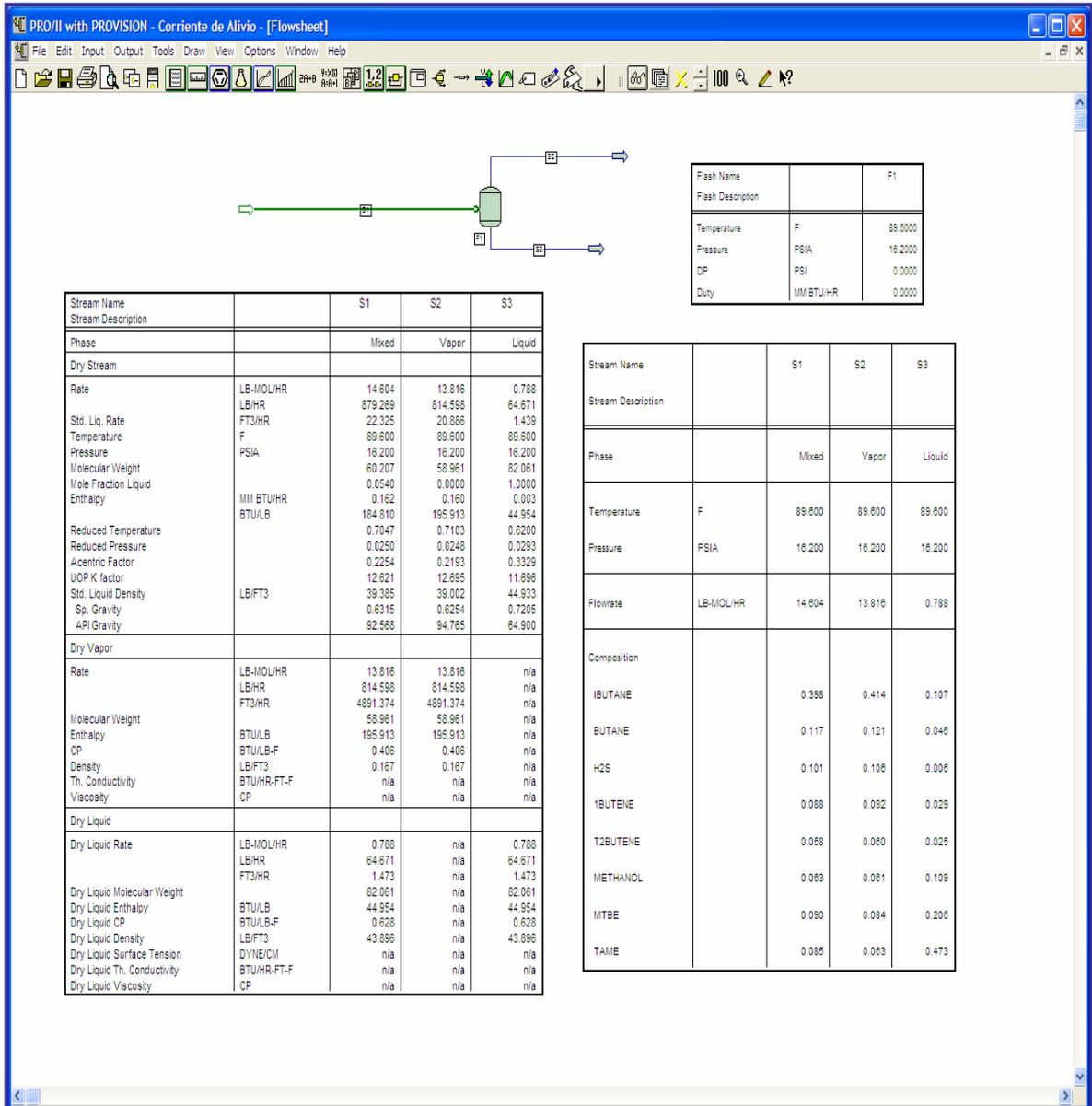


Figura IV.30: Resultados de la simulación en PRO II para determinar las propiedades de la mezcla de gases. Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II



A continuación se muestran las propiedades más resaltantes para efecto de los cálculos que se requiere realizar.

Tabla IV.14: Propiedades de la mezcla de gases.

Propiedad	Valor
Contenido de vapor	95,3 %
Contenido de condensado	4,7 %
Gravedad específica	0,6315
Gravedad API	92,568
Peso molecular	60,207

Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II

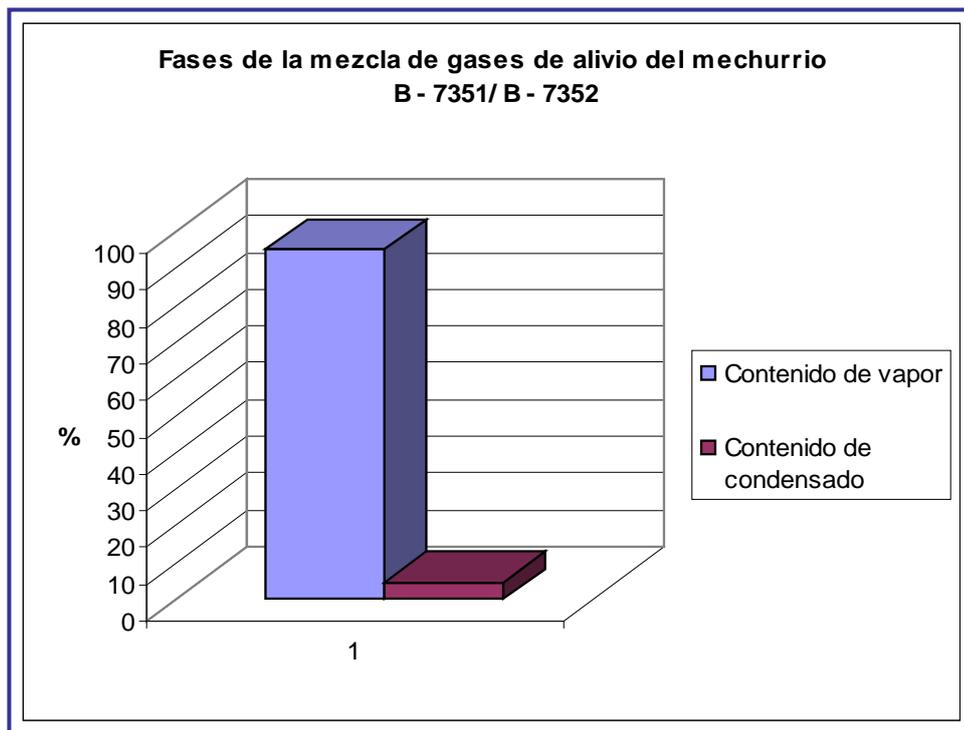


Figura IV.31: Proporción en las fases de la mezcla de gases de alivio del mecurrio B – 7351 / B - 7352. Fuente propia



Tabla IV.15: Propiedades de la fase vapor.

Propiedad	Valor
Gravedad específica (Aire = 1)	2,042
Densidad	0,167 lb/pie ³
Viscosidad (dinámica)	5,39x10 ⁻⁶ lb.s/pie
Peso molecular	53,19

Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II.

Tabla IV.16: Propiedades de la fase líquido.

Propiedad	Valor
Gravedad específica (Agua @ 60 °F)	0,7202
Densidad	43,88 lb/pie ³
Viscosidad (dinámica)	1,84x10 ⁻⁴ lb.s/pie
Peso molecular	82,34

Fuente Resultados de simulación mostrados en PRO II.

Al observar la Tabla IV.14 de las propiedades de la mezcla de gases y la Figura IV.31 que representa las proporciones en las que se encuentran las fases, se aprecia que el contenido de vapor es de un 95,3% mientras que el de líquido es apenas del 4,7%. La cantidad de flujo de alivio en estado líquido es muy pequeña en comparación al flujo en estado gaseoso antes de entrar al tambor D - 7351 en el que se realizará la separación de los combustibles condensados, por lo cual, únicamente se tomarán en cuenta las características de la fase vapor para efectuar los cálculos de los parámetros que dependen de las propiedades del fluido en la determinación de la velocidad de los gases en las tuberías donde están instalados los discos de ruptura.



4.4.3 Consideraciones sobre la operación de los equipos que conforman el sistema de alivio B – 7351 / B - 7352.

Como se describió en las consideraciones para el estudio de las condiciones de operación del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, la presión en el sistema fue evaluada en tres puntos con la finalidad de tener la data necesaria para realizar la estimación del caudal mediante los principios de conservación de la energía y la masa, específicamente a partir de los valores del término de disponibilidad en estos puntos. Uno de los puntos sobre los que se requería tener esta data, es el punto de entrada de los gases a la red de tuberías que forman el sistema de alivio. En la Figura IV.22 se observa que el instrumento medidor de presión está ubicado a la entrada del tambor separador de gas y condensado. La presión utilizada para calcular el término de disponibilidad será la indicada por este manómetro y para efectos de cálculos, se despreciará la caída de presión que experimenta el fluido en su paso a través del tambor D – 7351, debido a que las presiones que se manejan durante el proceso en los tres puntos estudiados y que se encuentran reflejadas en los diagramas de comportamiento de esta variable son muy bajas y similares entre si.

4.5 CÁLCULO DE CAUDAL, VELOCIDAD Y PRESIÓN EN LOS PUNTOS EN LOS QUE SE ENCUENTRAN INSTALADOS LOS DISCOS DE RUPTURA DEL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.

- ❖ Datos y cálculos preliminares sobre el arreglo de tuberías.

En la figura que se presenta a continuación, se señalan los puntos que se han considerado para nombrar los tramos sobre los cuales se realizó la evaluación hidráulica necesaria para calcular el caudal, la presión y la velocidad de los gases



en las tuberías en las que se encuentran instalados los discos de ruptura (ver Figura IV.32).

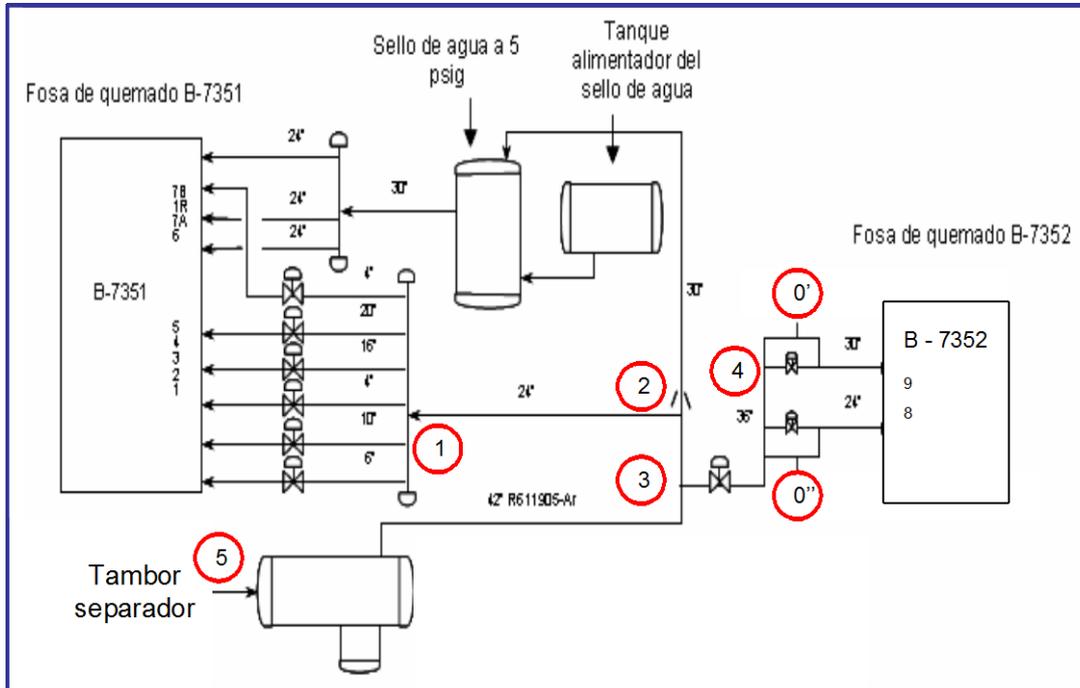


Figura IV.32: Puntos considerados para la evaluación hidráulica de la red. Fuente PDVSA

Todas las tuberías que componen el sistema son de acero al carbono comercial y tienen un espesor de 3/8". A continuación se presenta una tabla resumen de las características de cada uno de los tramos de la red de tuberías del mechurrio B – 7351 / B – 7352, considerados para la evaluación de los caudales y velocidades.



Tabla IV.17: Características de los tramos de tuberías considerados para la evaluación de los caudales y velocidades.

Tramo	Longitud (m)	D (pulg)	d (pulg)	d (m)	Rugosidad relativa
1 – 2	14,95	24	23,25	6,975	0,00000769
2 – 3	7,32	42	41,25	12,375	0,0000429
3 – 4	20,42	36	35,25	10,575	0,00005
5 - 3	90,22	42	41,25	12,375	0,0000429
4 – 0'	2,5	30	29,25	8,775	0,0000621
4 – 0''	2,5	24	23,25	6,975	0,00000769

Fuente propia.

Con los valores del diámetro interno, se calculó el área de la sección de cada uno de los tramos de tuberías estudiados (ver Tabla IV.18).

Tabla IV.18: Área de la sección de los tramos de tuberías estudiados.

Tramo	D (pulg)	Área de la sección (m ²)
1 – 2	24	0,2740
2 – 3	42	0,8625
3 – 4	36	0,6298
5 – 3	42	0,8625
4 – 0'	30	0,4337
4 – 0''	24	0,2740

Fuente propia.

Igualmente, en la Tabla IV.19, se muestran los accesorios de cada tramo y su longitud equivalente en metros de columna de gas (m. c. g).



Tabla IV.19: Accesorios de los tramos de tuberías considerados para la evaluación de caudales y velocidades.

Tramo	D (pulg)	Accesorios			
		Codos 90°	Tees	Válvulas	Longitud equivalente total (m. c. g)
1 – 2	24	2	No posee	No posee	950,98
2 – 3	42	No posee	2	No posee	1690,90
3 – 4	36	1	1	1 (compuerta)	1496,93
5 – 3	42	4	No posee	No posee	3381,80
4 – 0'	30	No posee	1	No posee	713,25
4 – 0''	24	No posee	1	No posee	475,49

Fuente propia.

En la Tabla IV.20 se señalan los valores de las cotas en los puntos indicados en la Figura IV.32 con respecto a la cota $Z = 0$ para la cual se tomó como referencia la superficie donde se encuentran las fundaciones del pipe rack.



Tabla IV.20: Cotas de los puntos considerados para la evaluación de caudales y velocidades.

Punto	Cota respecto a Z = 0 (m)
1	-0,82
3	10,1
4	-0,37
5	7,73
0'	-0,37
0''	-0,37

Fuente propia.

❖ Datos y cálculos preliminares para realizar el balance de energía.

Haciendo uso de la Ecuación III.1, se calculó la disponibilidad en los puntos cuyos valores de las variables son conocidos, siendo éstos el punto N° 1, el N° 4 y el N° 5 señalados en la Figura IV.32. Los valores de los términos de la ecuación utilizados para realizar este cálculo, se encuentran reflejados en los diagramas de comportamiento de la presión (Figuras IV.23, IV.25 y IV.27) y en la Tabla IV.20 que hace referencia a las cotas o altura de cada punto.

Al operar los valores dentro de la ecuación, se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla IV.21.

Ejemplo de cálculo:

El valor del peso específico en el Sistema Internacional es $\gamma = 0,0262908$ KN/m³

$$H1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \Rightarrow \text{sustituyendo}$$



$$H1 = \frac{8,268 \text{ KPa}}{0,0262908 \text{ KN/m}^3} + \frac{(0)^2}{2 * (9,81 \text{ m/s})} + (-0,82 \text{ m}) = 313,66 \text{ m.c.g}$$

Tabla IV.21: Disponibilidad en los puntos dato, para el estudio del sistema en cada medición realizada

Punto	Medición N°	H (m. c. g)
1	1	313,66
	2	365,98
	3	392,18
	4	386,94
	5	371,22
4	1	340,23
	2	366,43
	3	340,23
	4	340,23
	5	340,23
5	1	400,73
	2	400,73
	3	426,93
	4	426,93
	5	426,93

Fuente propia.



❖ Cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios para cada tramo del sistema.

Haciendo uso de las ecuaciones y el procedimiento descrito en el Capítulo III, se calculó el factor de fricción y las pérdidas por tuberías y accesorios para cada uno de los tramos señalados en la Figura IV.32.

Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla IV.22: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en los tramos 2 – 3 y 3 - 5 ($\varnothing 42''$) del mechurrio B – 7351/52.

D (pulg)	Caudal (m³/s)	V_{prom} (m/s)	Re	Factor de fricción	Pérd. total tramo 2 – 3 (m. c. g.)	Pérd. total tramo 3 – 5 (m. c. g.)
	0	0	0	0	0	0
42	2	2,318840	9541180,744	0,010687	38,681192	79,083908
	4	4,637681	19142361,490	0,010497	151,970259	310,704020
	6	6,956521	28713542,230	0,010426	339,630525	694,376950
	8	9,275362	38284722,980	0,010389	601,621412	1230,018241
	10	11,594202	47855903,720	0,0103656	937,924176	1917,591065
	12	13,913043	57427084,460	0,010397	1348,527830	2757,072462
	14	16,231884	66998265,210	0,013380	1833,425100	3748,447565
	16	18,550724	76569445,950	0,010329	2392,610795	4891,705755

Fuente propia.



Tabla IV.23: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en el tramo 3 - 4 ($\varnothing 36''$) del mecurrio B - 7351/52.

D (pulg)	Caudal (m^3/s)	V_{prom} (m/s)	Re	Factor de fricción	Pérd. total tramo 3 - 4 (m. c. g.)
36	0	0	0	0	0
	2	3,175611	11201008,670	0,010880	77,221560
	4	6,351222	22402017,340	0,010727	304,559960
	6	9,526833	33603026,020	0,010671	681,685673
	8	12,702445	44804034,690	0,010642	1208,540346
	10	15,878056	56005043,360	0,010624	1885,096515
	12	19,053667	67206052,030	0,010611	2711,337934
	14	22,229279	78407060,710	0,010602	3687,253786
	16	25,404890	89608069,380	0,010595	4812,836317

Fuente propia.



Tabla IV.24: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en el tramo 1 – 2 ($\varnothing 24''$) del mecurrio B – 7351/52.

D (pulg)	Caudal (m³/s)	V_{prom} (m/s)	Reynolds	Factor de fricción	Pérd. total tramo 1 – 2 (m. c. g.)
24	0	0	0	0	0
	2	7,299270	16981383,220	0,008523	308,486722
	4	14,598540	33962766,440	0,008199	1187,052905
	6	21,897810	50944149,660	0,008069	2628,273464
	8	29,197080	67925532,880	0,007997	4630,770510
	10	36,996350	84906916,100	0,007951	7193,960049
	12	43,795620	101888299,300	0,007919	13317,520910
	14	51,094890	118869682,500	0,007895	14001,250910
	16	58,394160	135851065,800	0,007877	18245,004660

Fuente propia.



Tabla IV.25: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en el tramo 4 – 0' (Ø30") del mechurrio B – 7351/52.

D (pulg)	Caudal (m³/s)	V_{prom} (m/s)	Re	Factor de fricción	Pérd. total tramo 4 – 0' (m. c. g.)
30	0	0	0	0	0
	0,2	0,461198	1349699,592	0,012537	1,066716
	0,4	0,922296	2699399,185	0,011902	4,050788
	0,6	1,383444	4049098,777	0,011644	8,916760
	0,8	1,844593	5398798,370	0,011502	15,657774
	1	2,305741	6748497,962	0,011410	24,270918
	1,02	2,351856	6883467,921	0,011403	25,235131
	1,04	2,397970	7018437,880	0,011396	26,218049
	1,06	2,444085	7153407,840	0,013892	27,219669

Fuente propia.



Tabla IV.26: Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios en el tramo 4 – 0” (Ø24”) del mecurrio B – 7351/52.

D (pulg)	Caudal (m³/s)	V_{prom} (m/s)	Re	Factor de fricción	Pérd. total tramo 4 – 0” (m. c. g.)
24	0	0	0	0	0
	0,2	0,461198	1349699,592	0,012537	1,066716
	0,4	0,922296	2699399,185	0,011902	4,050788
	0,6	1,383444	4049098,777	0,011644	8,916760
	0,8	1,844593	5398798,370	0,011502	15,657774
	1	2,305741	6748497,962	0,011410	24,270918
	1,02	2,351856	6883467,921	0,011403	25,235131
	1,04	2,397970	7018437,880	0,011396	26,218049
	1,06	2,444085	7153407,840	0,013892	27,219669

Fuente propia.



❖ Desarrollo del cálculo de caudales y velocidades en las tuberías de 24 y 30 pulgadas en las que se encuentran instalados los discos de ruptura del mechurrio B – 7351/ B – 7352, mediante la aplicación de las ecuaciones de Balance de Energía y Balance de Masa. [3]

Una vez realizados los cálculos preliminares señalados en secciones anteriores sobre la disponibilidad en los puntos de medición así como las pérdidas por fricción en tuberías, válvulas y accesorios, se plantearon las ecuaciones del Balance de Energía y Balance de Masa según lo señalado en el Capítulo III y aplicadas al sistema en estudio se observan de la siguiente manera:

Balance de Energía:

$$H_2 = H_1 + hf_{12} \text{ (Ec. IV.1)}$$

$$\left. \begin{array}{l} H_3 = H_2 + hf_{23} \text{ (Ec. IV.2)} \\ H_3 = H_4 + hf_{34} \text{ (Ec. IV.3)} \end{array} \right\} H_{3eq}$$

$$H_{5eq} = H_{3eq} + hf_{35} \text{ (Ec. IV.4)}$$

$$\left. \begin{array}{l} H_0 = H_4 - hf_{40'eq} \text{ (Ec. IV.5)} \\ H_0 = H_4 - hf_{40''eq} \text{ (Ec. IV.6)} \end{array} \right\} H_{0eq}$$



Balance de Masa:

$$Q5_{eq} = Q3_{eq} \text{ (Ec IV.7)}$$

$$Q3_{eq} = Q23 + Q34 \text{ (Ec. IV.8)}$$

$$Q34 = Q40'_{eq} + Q40''_{eq} \text{ (Ec. IV.9)}$$

$$Q40'_{eq} = 2 * Q40' \text{ (Ec. IV.10)} \therefore Q40' = Q40'_{válvula} = Q40'_{disco}$$

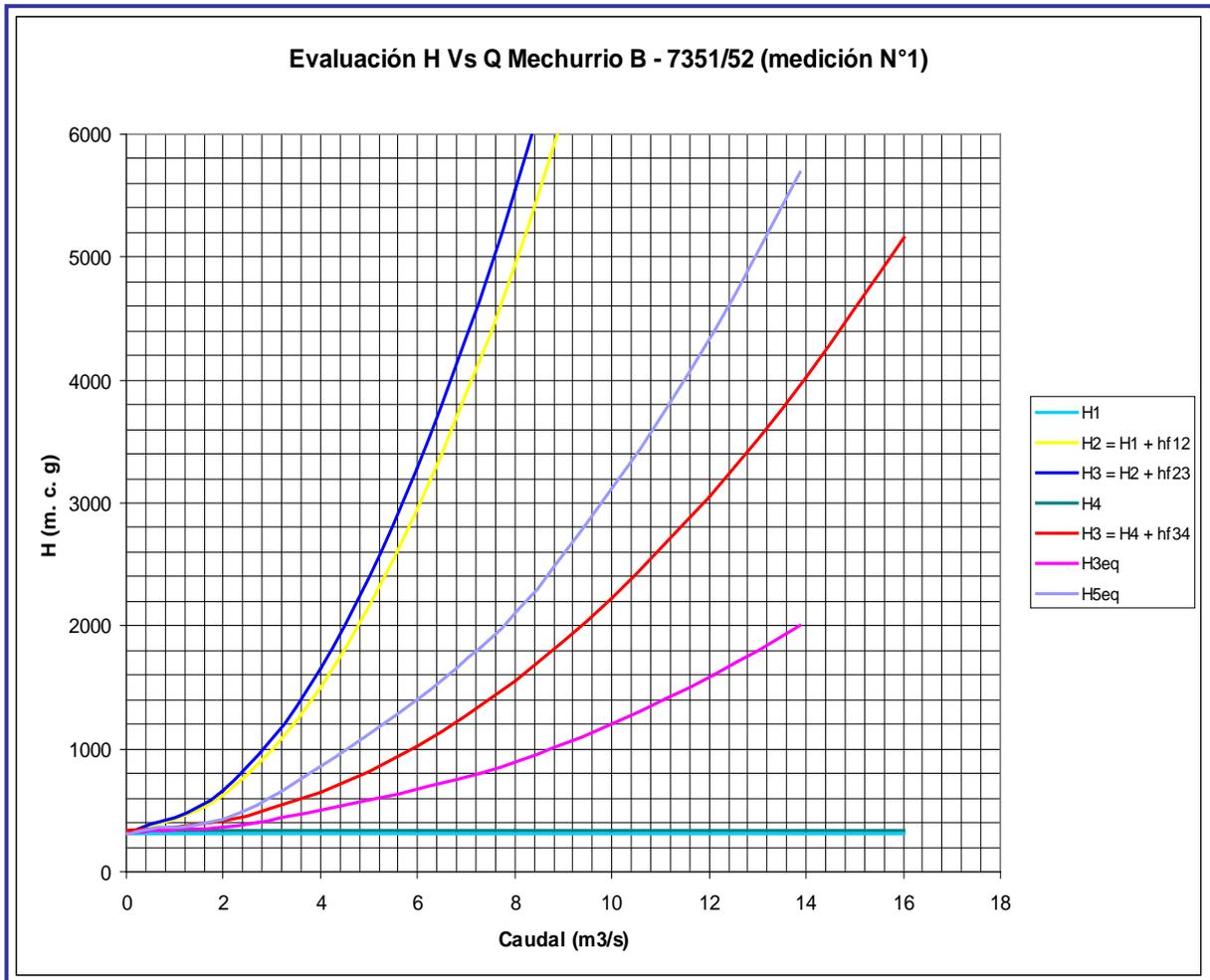
$$Q40''_{eq} = 2 * Q40'' \text{ (Ec. IV.11)} \therefore Q40'' = Q40''_{válvula} = Q40''_{disco}$$

A partir de las ecuaciones presentadas, se construyeron las gráficas para cada uno de los valores obtenidos en las mediciones de las variables fundamentales, y empleando métodos gráficos se calcularon los valores de caudal y velocidad de los gases en los tramos de interés. A continuación se muestran las gráficas generadas y los cálculos a través de un ejemplo para una de las mediciones realizadas.

En el Gráfico IV.1, se encuentran representadas todas las ecuaciones del Balance de Energía aplicado en la evaluación del sistema de alivio B – 7351 / B – 7352, asimismo se presentan los valores de disponibilidad en dos de los puntos de medición, el N° 1 y el N° 4.



Gráfico IV.1: Curvas de comportamiento de los tramos evaluados del Sistema de Alivio B – 7351/ B - 7352.



Fuente propia.

El procedimiento utilizado se describe a continuación:

❖ En primer lugar, haciendo uso de la Ecuación IV.1 se construyó la curva de comportamiento del tramo 12. Luego, a esta curva, se le sumaron a caudal constante las pérdidas del tramo 32 considerando que éstos se encuentran dispuestos en serie, procedimiento que está representado mediante la Ecuación IV.2.

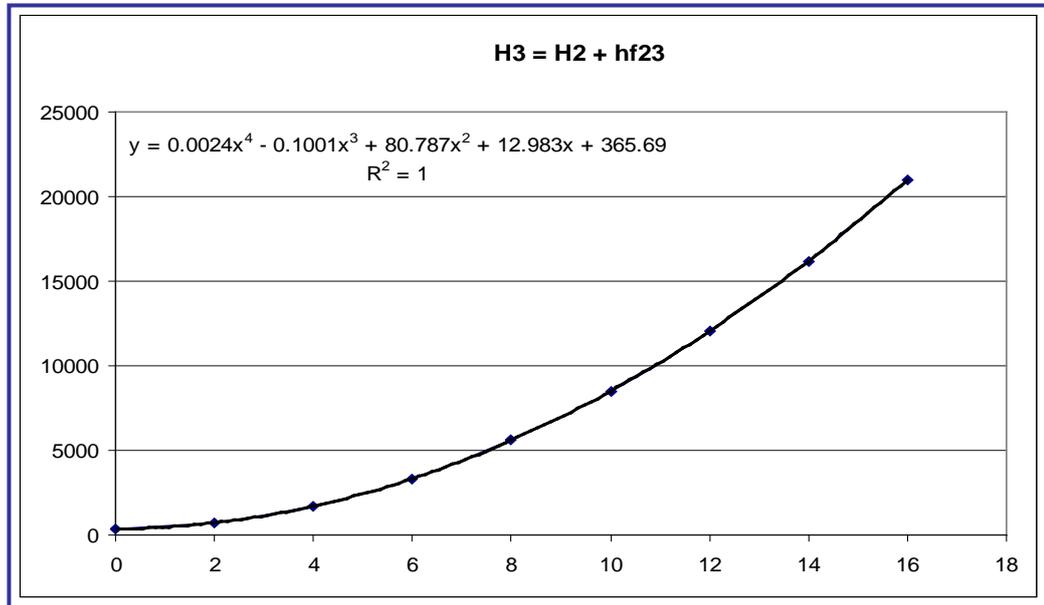


❖ Como siguiente paso, se construyó la curva que representa el comportamiento del tramo 34 según la Ecuación IV.3. El tramo 34, se encuentra en paralelo con el equivalente de las resistencias en serie de los tramos 21 y 32 por lo que el paso siguiente fue la obtención de una nueva curva la cual representa el equivalente de las resistencias de los tramos involucrados, en este caso en paralelo, denominada H_{3eq} . Para ello, se graficaron las curvas de cada uno de los tramos 32 y 34, y mediante la aplicación del programa Excel que permite obtener la ecuación de una curva al agregar la línea de tendencia que generan los puntos o pares ordenados que la componen, se determinaron las ecuaciones de $H_3 = H_2 + hf_{32}$ y $H_3 = H_4 + hf_{34}$ (Ecuación IV.2 y Ecuación IV.3). La tendencia que se fijó fue una polinómica de grado cuatro, resultando esto apropiado ya que el coeficiente de ajuste R^2 tiene un valor igual a la unidad en este caso. Tomando diferentes valores de disponibilidad en cada tramo representados por la ordenada, se introdujeron en las ecuaciones polinómicas de cada uno y se despejaron los valores de la abscisa que corresponden al caudal. Con los nuevos pares ordenados, formados por los valores de disponibilidad fijados y los de caudal determinados con el uso de las ecuaciones, se construyó la curva de H_{3eq} , sumando a valores de disponibilidad constante los caudales como corresponde en el caso de tramos en paralelo. [3]

Las curvas y sus respectivas ecuaciones se muestran a continuación.

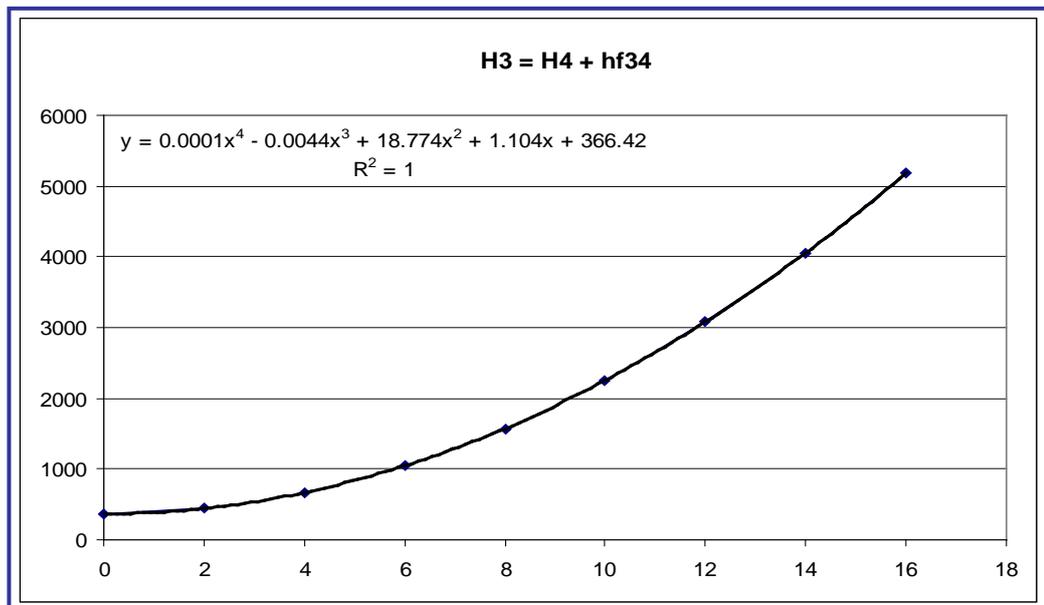


Gráfico IV.2: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 32 del sistema de alivio B – 7351/B – 7352.



Fuente propia.

Gráfico IV.3: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 34 del sistema de alivio B – 7351/B – 7352.



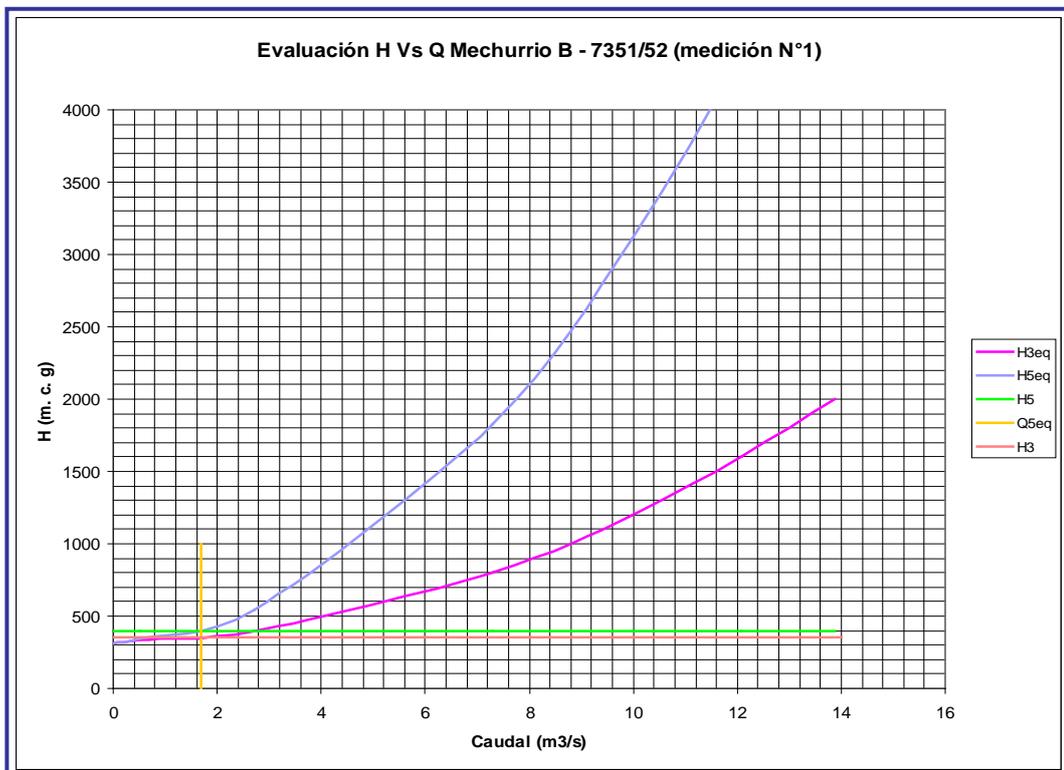
Fuente propia.



❖ Finalmente, para graficar la curva que reflejara el comportamiento de todo el sistema, a la construida en el paso anterior denotada como H_{3eq} , se le sumaron a caudal constante las pérdidas del tramo 53 por encontrarse las resistencias en serie; este paso se encuentra representado por la Ecuación IV.4.

Una vez construida la gráfica que representa el comportamiento de todo el sistema llamada H_{5eq} y con el valor de H_5 , se leyó el valor del caudal equivalente del total del arreglo evaluado, denominándose este Q_{5eq} . Con este valor a caudal constante, como está representado en la Ecuación IV.7 del Balance de Masa, gráficamente se determinó el valor de disponibilidad en el punto 3 sobre la curva de H_{3eq} (ver Gráfico IV.4).

Gráfico IV.4: Obtención del valor de H_3 a partir de la aplicación de las ecuaciones de Balance de Energía y Masa mediante método gráfico.



Fuente propia.



Los valores de disponibilidad y caudal determinados hasta el momento con los pasos aplicados, aparecen reflejados en la Tabla IV.27.

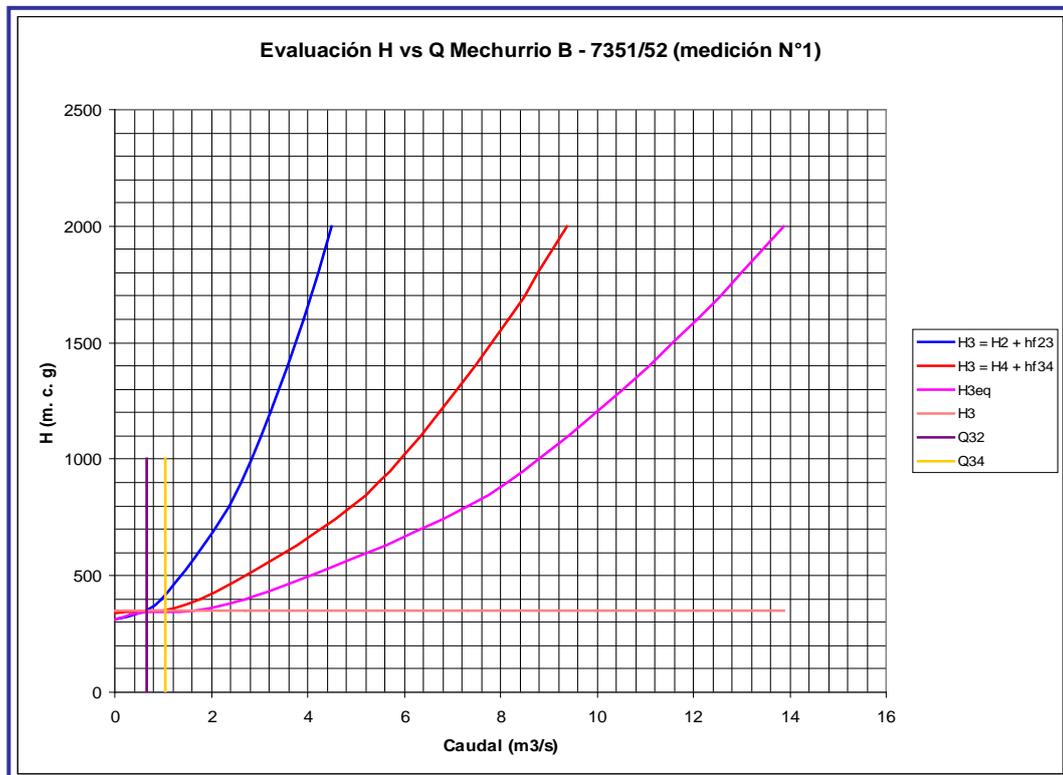
Tabla IV.27: Caudal total del arreglo y disponibilidad en el punto N° 3.

Parámetro	Valor
$Q_{5eq} = Q_3$	$1,7 \text{ m}^3/\text{s}$
H_3	351,5 m. c. g

Fuente propia.

Tomando el valor de disponibilidad en el punto N° 3 y sobre las gráficas que representan los tramos 32 y 34, se leen los caudales que pasan a través de cada uno de ellos. El siguiente gráfico muestra el procedimiento y en la Tabla IV.28 se indican los valores.

Gráfico IV.5: Lectura de los caudales de los tramos 32 y 34 a partir del valor de H_3 .



Fuente propia.



Tabla IV.28: Valores de caudal en los tramos 32 y 34.

Parámetro	Valor
Q_{32}	0,65 m ³ /s
Q_{34}	1,05 m ³ /s

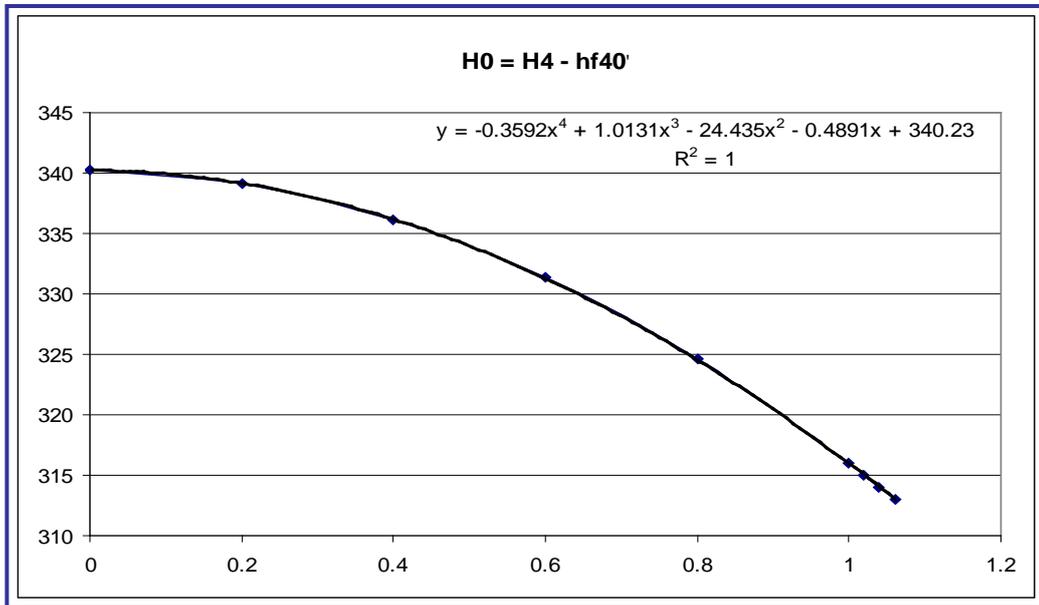
Fuente propia.

Luego, a partir del valor de disponibilidad conocida en el punto N° 4 y el caudal total que circula a través del tramo 34, se determinaron los caudales para cada una de las tuberías que conforman los tramos del arreglo señalados como 40' y 40'', asociados al arreglo en by – pass en el que se encuentran instalados los discos de ruptura de diámetro 30 y 24 pulgadas respectivamente. El procedimiento se describe a continuación y se muestran los gráficos correspondientes.

❖ Aplicando las Ecuaciones IV.5 y la IV.6, se construyeron las curvas de comportamiento de los tramos 40' y 40''. Luego, al igual que para los tramos 32 y 34, se determinaron las ecuaciones de las líneas de tendencia de cada una de las gráficas (Ver Gráfico IV.6 y IV.7).

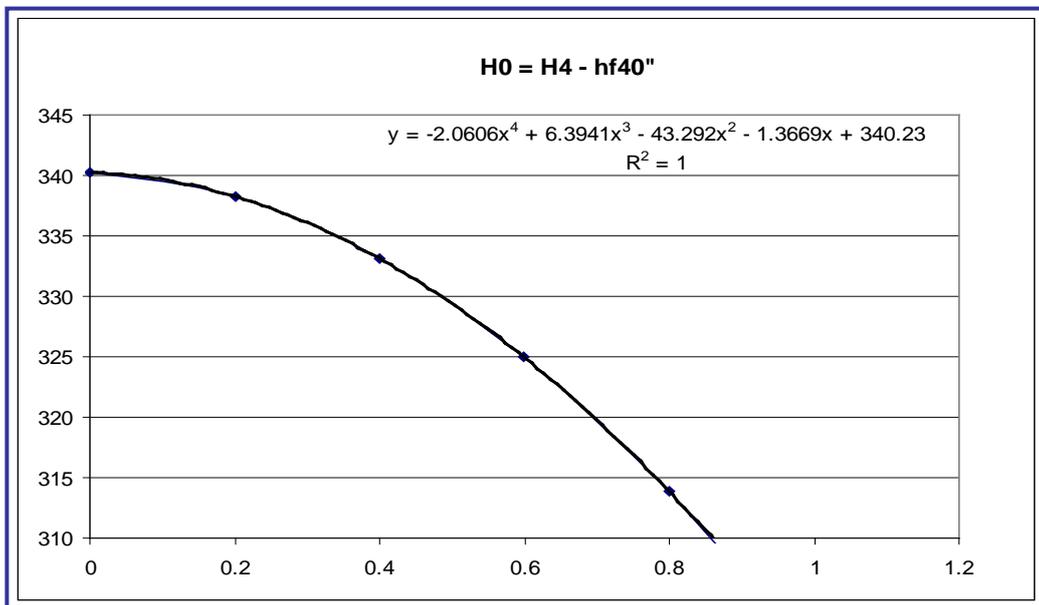


Gráfico IV.6: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 40'.



Fuente propia.

Gráfico IV.7: Curva y ecuación que representa el comportamiento hidráulico del tramo 40".

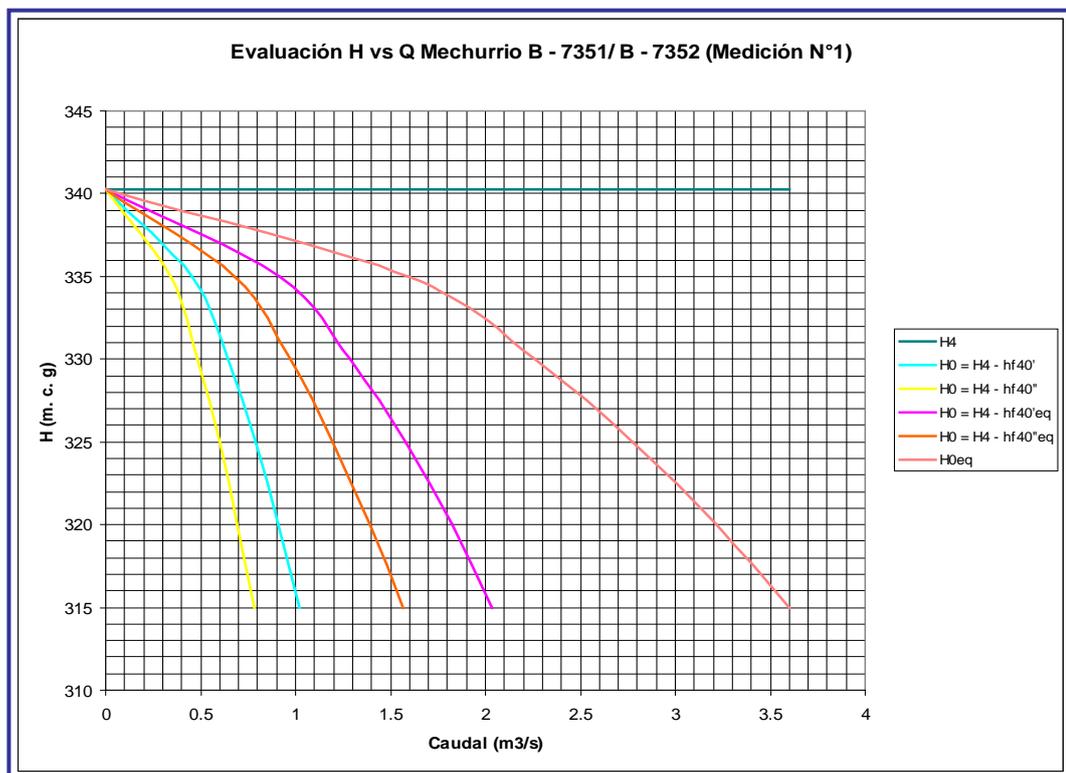


Fuente propia.



Con estas ecuaciones, siguiendo un procedimiento análogo al aplicado para determinar la curva equivalente de los tramos 32 y 34, se obtuvieron los puntos que luego serían sumados para construir la curva de los equivalentes de los tramos de 30 y 24 pulgadas correspondientes a los dos arreglos en by – pass que pertenecen al sistema de alivio B – 7352, así como el equivalente total de los cuatro tramos que se observan en la Figura IV.32IV.30. Las gráficas que reflejan el proceso se muestran a continuación. [3]

Gráfico IV.8: Curvas de comportamiento de los arreglos en by – pass de 30 y 24 pulgadas en los que se encuentran instalados los discos en estudio.

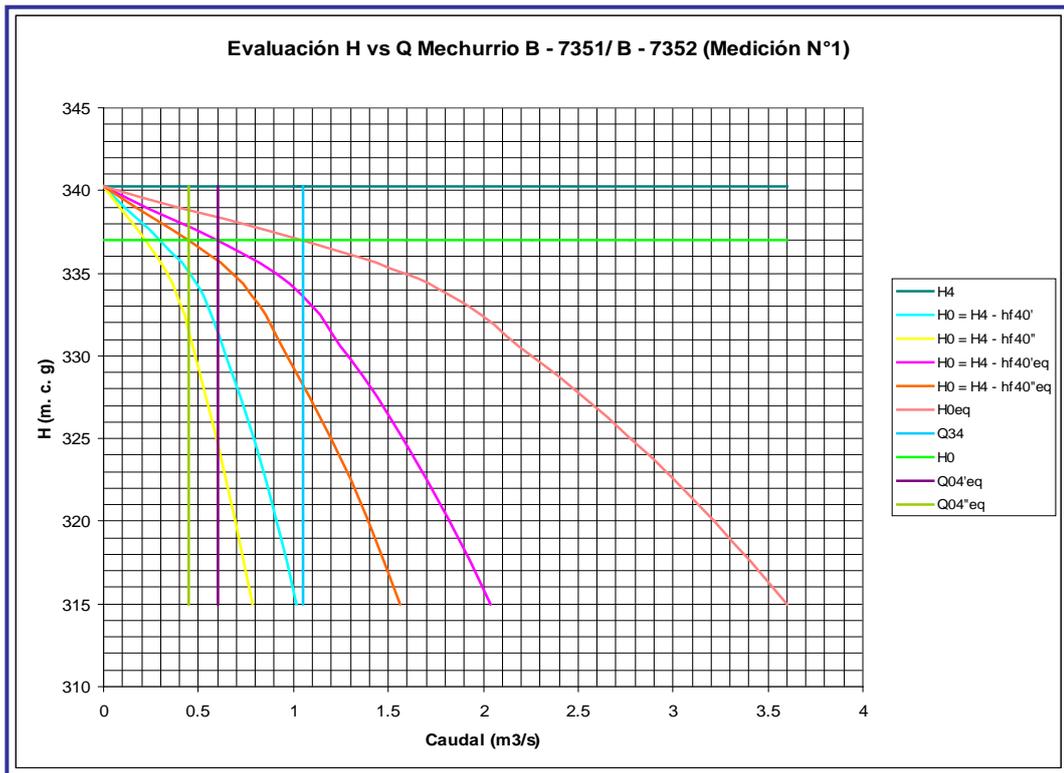


Fuente propia.



❖ El siguiente paso fue la determinación del valor de H_0 , para lo cual, gráficamente se interceptó el valor del caudal total que pasa por el tramo 34 con la curva que representa el equivalente de los cuatro tramos, es decir, los dos arreglos en by – pass mencionados. Luego, con el valor de la disponibilidad en el punto 0, se lee el valor de los caudales que pasan por cada uno de los tramos de 30 y 24 pulgadas, tanto los principales en los que se encuentran instaladas las válvulas como en los que se encuentran instalados los discos de ruptura. El procedimiento está asociado a las ecuaciones IV.9, IV.10 y IV.11 del Balance de Masa y gráficamente se observa como sigue:

Gráfico IV.9: Determinación de caudales en los tramos de 30 y 24 pulgadas del mechurrio B - 7352.



Fuente propia.



Los valores de los parámetros evaluados en esta parte del cálculo se muestran en la Tabla IV.29.

Tabla IV.29: Valores de disponibilidad y caudales en los tramos de 30 y 24 pulgadas del mechurrio B – 7352.

Parámetro	Valor
H_0	337 m. c. g
$Q_{04'eq}$	0,60 m ³ /s
$Q_{04''eq}$	0,45 m ³ /s

Fuente propia.

Finalmente, para determinar el caudal que pasa por cada uno de los cuatro tramos, aplicando nuevamente las ecuaciones IV.10 y IV.11 del Balance de Masa, se obtienen los valores reflejados en la tabla a continuación.

Ejemplo de cálculo.

$Q_{40'eq} = 2 * Q_{40'}$ (Ec. IV.10); $Q_{40''eq} = 2 * Q_{40''}$ (Ec. IV.11), despejando y sustituyendo:

$$Q_{40'} = \frac{Q_{40'eq}}{2} \Rightarrow Q_{40'} = \frac{0,6 \frac{m^3}{s}}{2} = 0,3 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{40''} = \frac{Q_{40''eq}}{2} \Rightarrow Q_{40''} = \frac{0,45 \frac{m^3}{s}}{2} = 0,225 \frac{m^3}{s}$$



Tabla IV.30: Caudal que pasa a través de los arreglos en by – pass de 30 y 24 pulgadas en los que se encuentran instalados los discos de ruptura.

Parámetro	Valor
Q _{04'} - válvula	0,30 m ³ /s
Q _{04'} - disco	0,30 m ³ /s
Q _{04"} - válvula	0,225 m ³ /s
Q _{04"} - disco	0,225 m ³ /s

Fuente propia.

Para determinar la velocidad de los gases en las tuberías de los arreglos de 30 y 24 pulgadas, se aplicó la Ecuación III.8. A continuación se presenta un ejemplo de cálculo y los resultados para la primera medición efectuada.

Ejemplo de cálculo.

$Q = V.A$ Ec. III.8, despejando y sustituyendo:

$$V_{30''} = \frac{Q_{30''}}{A_{30''}} = \frac{0,30 \frac{m^3}{s}}{0,4337m^2} = 0,6717 \frac{m}{s}; \quad V_{24''} = \frac{Q_{24''}}{A_{24''}} = \frac{0,225 \frac{m^3}{s}}{0,2740m^2} = 0,8212 \frac{m}{s}$$

Finalmente, los resultados para todas las mediciones se encuentran reflejados en la Tabla IV.31.



Tabla IV.31: Valores de caudal y velocidad en los tramos de 30 y 24 pulgadas

Medición N°	Tramo 40' (Ø 30")		Tramo 40'' (Ø 24")	
	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
1	0,300	0,6917	0,225	0,8212
2	0,280	0,6456	0,220	0,8029
3	0,240	0,5534	0,200	0,8097
4	0,280	0,6456	0,240	0,8759
5	0,220	0,5073	0,200	0,8097

Fuente propia.

Para determinar el valor de la presión producto del flujo sobre los discos de ruptura, se realizó el cálculo a partir de la Ecuación III.1, aplicada en los puntos 0' y 0'' donde se encuentran instalados los discos de ruptura. Seguidamente se muestra un ejemplo de cálculo y los resultados para cada una de las mediciones.

Ejemplo de cálculo.

Con los datos obtenidos de la evaluación de velocidades y caudales para la primera medición:

$$H_0 = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 \Rightarrow P_0 = \gamma \cdot \left(H_0 - \frac{V_0^2}{2g} - Z_0 \right) \Rightarrow \text{sustituyendo}$$

Para el disco de 30 pulgadas:

$$P_{0'} = 0,0262908 \frac{kN}{m^3} \cdot \left(337 m.c.g - \frac{(0,6917 \frac{m}{s})^2}{2 \cdot (9,81 \frac{m}{s^2})} - (-0,37m) \right)$$



$$P_{0'} = 8,8691 \text{ kPa}$$

Para el disco de 24 pulgadas:

$$P_{0''} = 0,0262908 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot \left(337\text{m} - \frac{(0,8212 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} - (-0,37\text{m}) \right)$$

$$P_{0''} = 8,8688 \text{ kPa}$$

Tabla IV.32: Valores de presión sobre los discos de ruptura en las tuberías de 30 y 24 pulgadas.

Medición N°	Presión sobre disco 30'' punto 0' (kPa)	Presión sobre disco 24'' punto 0'' (kPa)
1	8,8691	8,8688
2	9,6311	9,6308
3	8,9410	8,8520
4	8,9410	8,8520
5	8,9390	8,8450

Fuente propia.

4.6 CÁLCULO DE LAS CARGAS PRODUCIDAS POR LA PRESIÓN SOBRE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Para realizar la evaluación del esfuerzo al que se encuentran sometidos los discos de ruptura durante su operación en el mechurrio B – 7351/ B – 7352 haciendo uso del software Visual Nastran, se determinaron las cargas que actúan sobre los mismos. Para ello, se aplicó la Ecuación III.9, despejando la variable sobre la cual se desea conocer el valor, en este caso la fuerza.

$$P = \frac{F}{A_d} \quad \Rightarrow \quad F = P \cdot A_d \quad \text{Ec. III.9}$$



Como se describió anteriormente en este capítulo, los discos de ruptura están formados principalmente por una sección metálica de forma abovedada cuya curvatura es poco pronunciada, de esta manera se observa en el certificado de conformidad de las características del producto emitido por el fabricante que contiene el plano de las principales dimensiones del mismo (ver Figura IV.33).

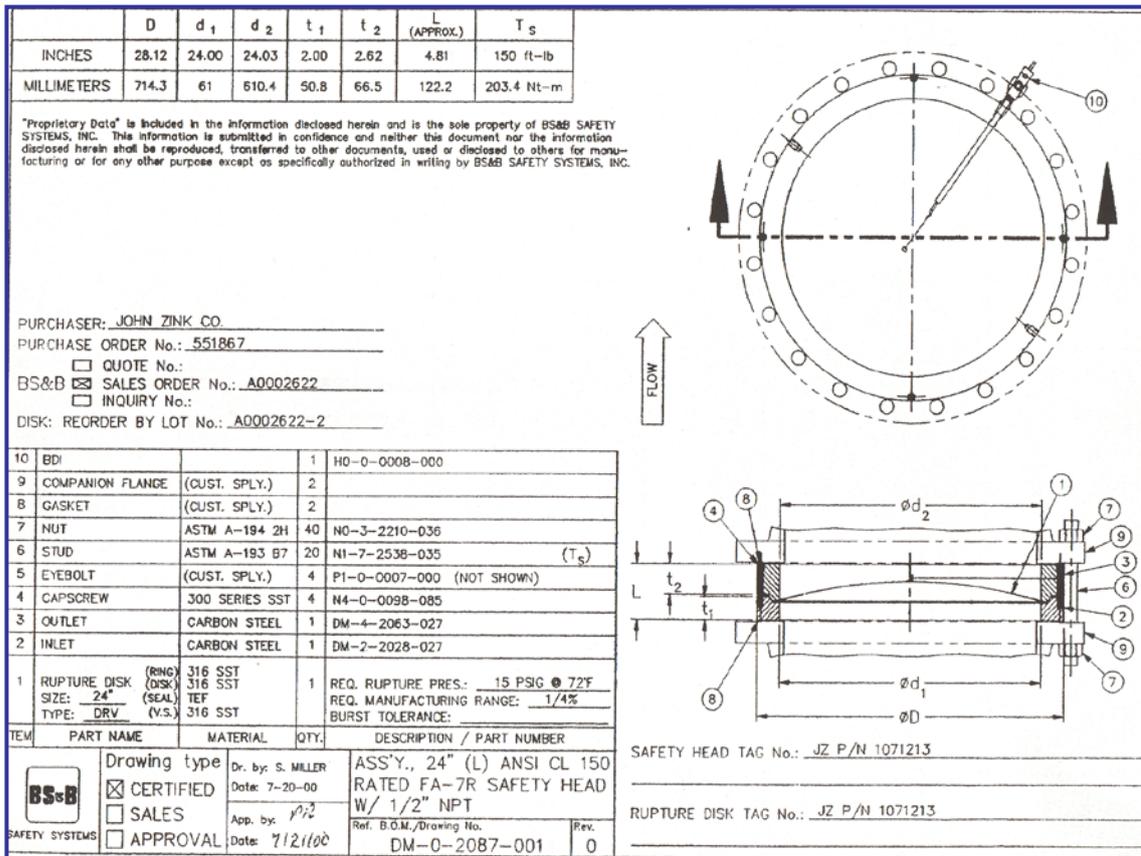


Figura IV.33: Certificado de características del disco de ruptura de 24 pulgadas emitido por el fabricante. Fuente BS&B Safety Systems

En este sentido, se realizó el modelo de los discos en tres dimensiones haciendo uso del programa AutoCAD, según las dimensiones especificadas por el fabricante en los planos. Igualmente, a través de este software, se pudo conocer el valor del área de los discos necesaria para calcular la carga debida a la presión. A continuación se los valores de las áreas en la Tabla IV.33.



Tabla IV.33: Valores del área de los discos utilizada para calcular la carga debida a la presión

Disco Ø _{NOMINAL} (pulg)	Área (m ²)
30	0,5624
24	0,3901

Fuente propia.

Finalmente, y aplicando la Ecuación III.9, se calcularon las cargas para cada valor de presión. En el ejemplo a continuación se observa el procedimiento para el cálculo y el resto los resultados se encuentran en la Tabla IV.34.

Ejemplo de cálculo.

Para el disco de ruptura de 30 pulgadas de diámetro y uno de los valores de presión sobre el mismo, la carga a la que está sometido es:

$F = P.A_d$, sustituyendo los valores conocidos para la presión y el área:

$$F = 8,8961 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,5624 m^2 \Rightarrow F = 4,9880 kN$$

Los resultados finales se muestran a continuación:

Tabla IV.34: Cargas sobre los discos de ruptura debidas a la presión.

Medición N°	Carga sobre disco Ø30'' (kN)	Carga sobre disco Ø24'' (kN)
1	4,9880	3,4597
2	5,4165	3,7570
3	5,0284	3,4532
4	5,0284	3,4532
5	5,0273	3,4504

Fuente propia.



4.7 DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO SOBRE LOS DISCOS DE RUPTURA EN VISUAL NASTRAN.

Visual Nastran es un software que permite determinar esfuerzos por método de elementos finitos. En esta oportunidad fue utilizado para evaluar el esfuerzo al que se encuentran sometidos los discos de ruptura en operación. Para ello se utilizaron los modelos de los discos realizados en AutoCAD, se importaron hacia Visual Nastran y se le otorgaron las propiedades del material con el que se encuentran fabricados (acero inoxidable 316), según las especificaciones encontradas en las hojas de datos de estos dispositivos anexas en el OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR El Palito Refinery Ground Flare B – 7351/ B – 7352.

Las propiedades asignadas al material, se presentan en la Tabla IV.35

Tabla IV.35: Propiedades del material de fabricación de los discos de ruptura.

Propiedad	Valor
Densidad de masa	$7,99 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Elasticidad	193 GPa
Relación de Poisson	0,25
Esfuerzo de Fluencia	290 MPa
Esfuerzo Último	579 MPa

Fuente www.matweb.com

Para realizar este estudio, se tomaron en cuenta varias consideraciones que se exponen a continuación.



❖ La instalación de los discos se realiza en posición vertical dentro de un soporte y éste es el que se ajusta a la tubería. La colocación de los discos dentro de este soporte restringe el movimiento de los mismos en tres dimensiones, lo que fue reflejado en el programa al momento de evaluar por elementos finitos, colocando una restricción en el borde del disco (ver Figura IV.34).

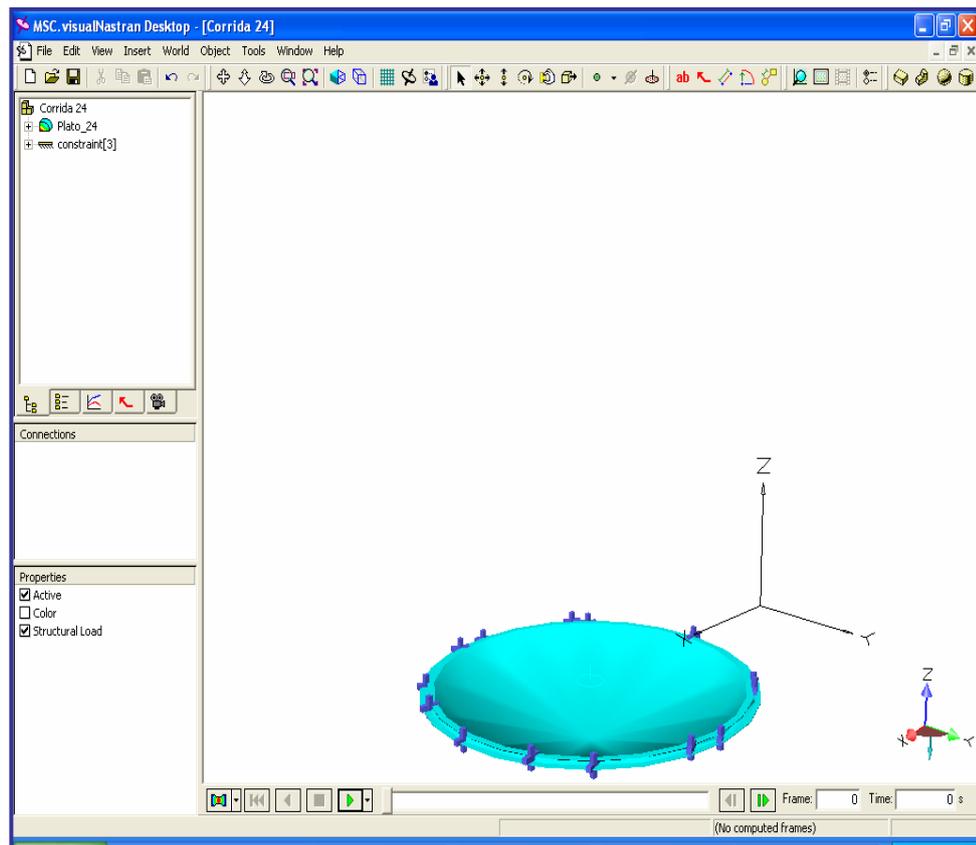


Figura IV.34: Simulación de las condiciones de instalación de los discos de ruptura. Fuente propia.



❖ Se realizó el diagrama de fuerzas que actúan sobre los discos de ruptura en operación.

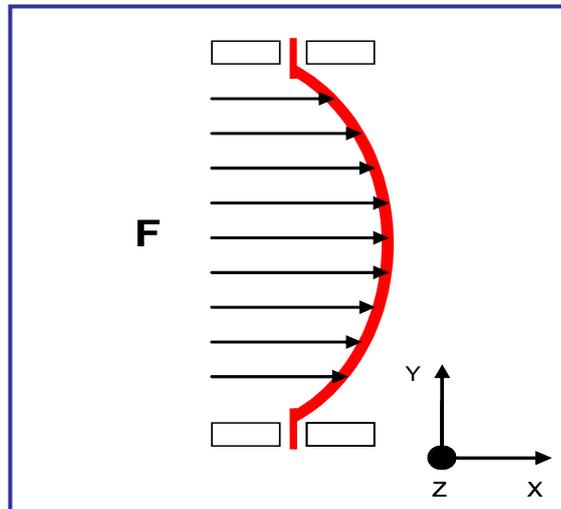


Figura IV.35: Carga sobre los discos de ruptura del Mechurrio B – 7352. Fuente propia.

En el diagrama de fuerzas se observa una carga distribuida uniformemente sobre la superficie del disco que se encuentra del lado del proceso; dicha carga se debe a la presión generada por los gases de alivio en su paso a través de las instalaciones del mechurrio B – 7351/52 y sus valores fueron determinados en el apartado anterior. La carga con la cual se realizó la evaluación del esfuerzo, es la de mayor valor entre las calculadas en el apartado anterior, resultando para ambos discos la carga determinada con los parámetros asociados a la segunda medición de presión y temperatura en el sistema de alivio B – 7351/ B - 7352, tal como se muestra en la Tabla IV.36.

Tabla IV.36: Carga crítica sobre los discos de ruptura utilizadas para la evaluación del esfuerzo.

Disco $\varnothing_{\text{NOMINAL}}$ (pulg)	Carga (kN)
30	5,4165
24	3,757

Fuente propia.



Los discos en estudio son de tipo abovedado convencional, los cuales se encuentran diseñados para fallar por tensión, adicionalmente se conoce que el radio de curvatura de los mismos es pequeño y el espesor de la lámina con la que se encuentran fabricados es muy delgado. Conociendo estas condiciones, se plantea que hay una distribución uniforme de esfuerzo y que los discos se encuentran entonces en un estado de esfuerzo simple o de tensión pura. [13] [9]

Finalmente, se insertó el valor de la carga como una carga estructural, nombre que recibe una carga uniformemente distribuida en Visual Nastran (ver Figuras IV.36 y IV.37)

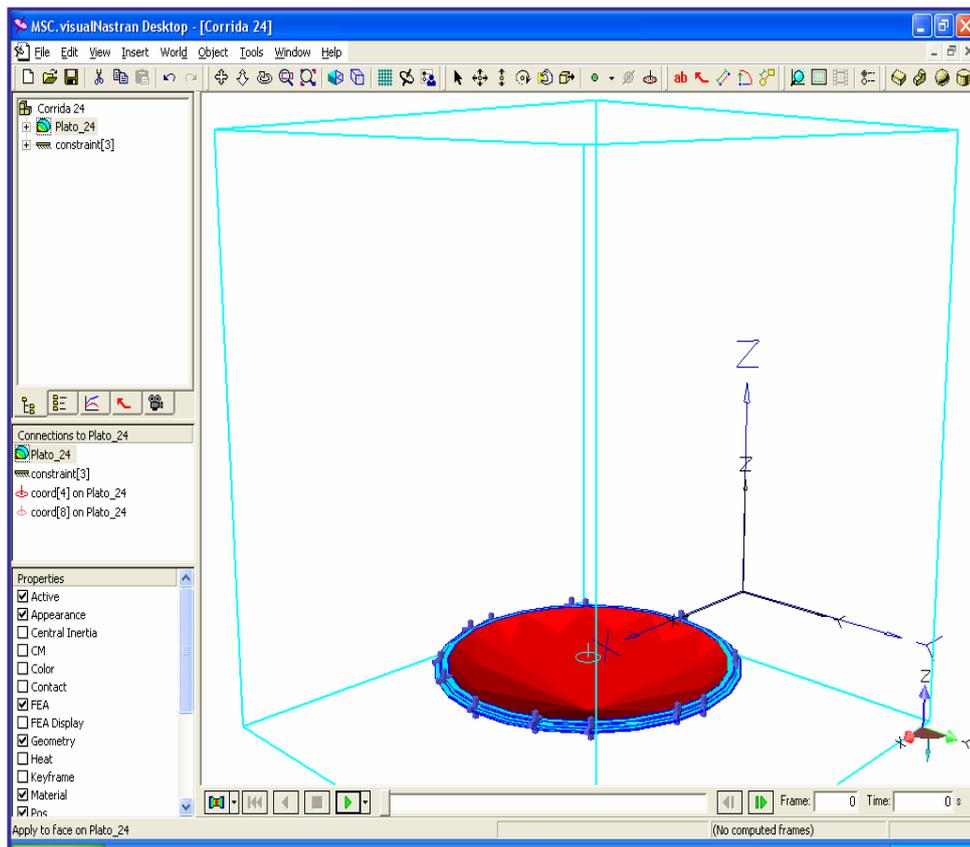


Figura IV.36: Superficie del disco sobre la cual actúa la carga debida a la presión de los gases del lado del proceso. Fuente propia

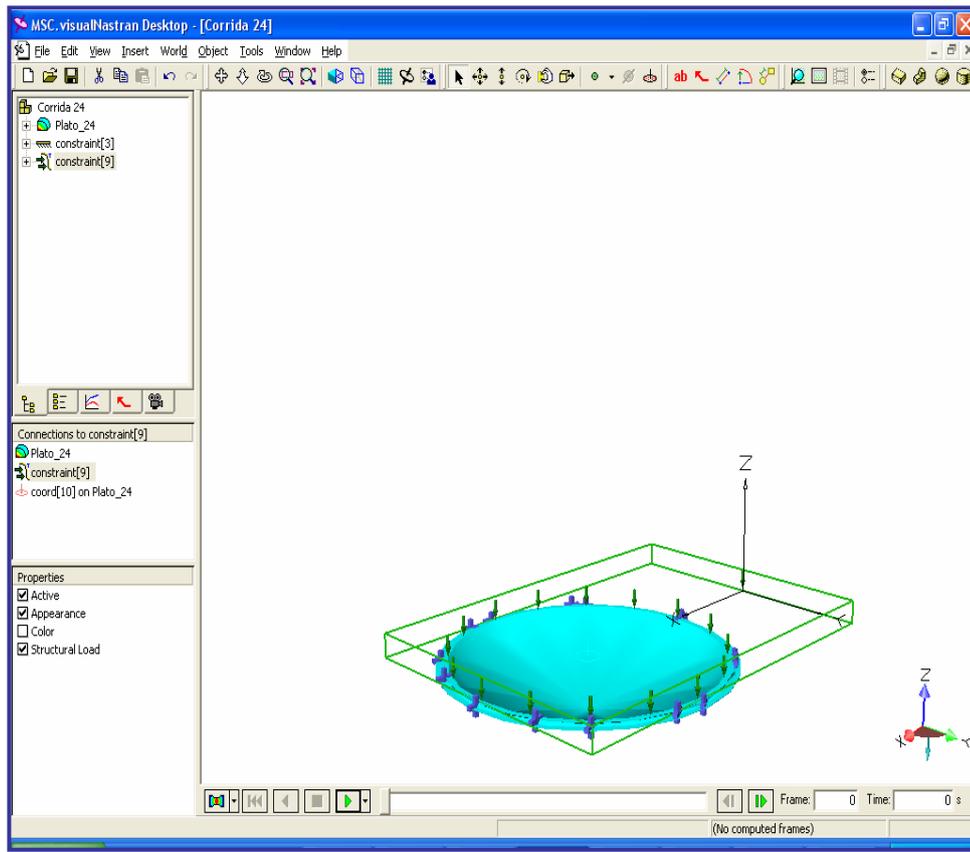


Figura IV.37: Simulación de las condiciones de carga de los discos de ruptura en operación.

Fuente propia

Una vez asignadas las propiedades y cargas, se realizó la evaluación efectuando varias corridas modificando el factor de mallado para calcular el valor del esfuerzo máximo con diferentes números de nodos y elementos. Por último, se realizó el análisis de convergencia correspondiente para determinar el número de nodos y elementos óptimo que arrojará el valor más exacto del esfuerzo.

En las Tablas IV.37 y IV.38 se muestran los resultados de las corridas realizadas sobre los discos de 24 y 30 pulgadas, destacando el número de nodos, el número de elementos y el esfuerzo máximo alcanzado.



Tabla IV.37: Resultados de la determinación del esfuerzo en el disco de 24" a través de Elementos Finitos

Corrida N°	N° de Nodos	N° de Elementos	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	9449	4792	129
2	12709	6470	116
3	8760	4411	134
4	12082	6069	116
5	11386	5720	123
6	9015	4553	143
7	10958	5507	120
8	12623	6336	117
9	12525	6262	115
10	12351	6305	118
11	10529	5273	125
12	13269	6704	132
13	10689	5384	145
14	8652	4235	166
15	6525	3300	93
16	12438	6299	120
17	9725	4898	158
18	12353	6203	117
19	9105	4602	123
20	12475	6285	117
21	13337	7324	175
22	13822	7257	155

Fuente propia



Tabla IV.38: Resultados de la determinación del esfuerzo en el disco de 30" a través de Elementos Finitos

Corrida N°	N° de Nodos	N° de Elementos	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	24624	12380	117
2	6014	3026	132
3	12895	6424	117
4	12202	6162	114
5	9297	4691	120
6	12932	6484	116
7	6525	3300	92,5
8	8845	4158	113
9	12709	6470	117
10	12914	6454	117
11	12576	6299	117
12	8814	4425	115
13	17191	4425	96
14	14885	7466	104
15	12745	6385	118
16	13815	6926	117
17	12389	6231	120
18	18700	9402	124
19	8854	4295	228
20	12748	6460	116
21	7669	3862	103
22	22662	8054	121

Fuente propia



Con los resultados reflejados en las tablas anteriores, se graficó el esfuerzo máximo en función del número de nodos, para determinar el número apropiado de estos con el que se obtiene un mallado en el que se estabiliza el valor del esfuerzo arrojado por el programa.

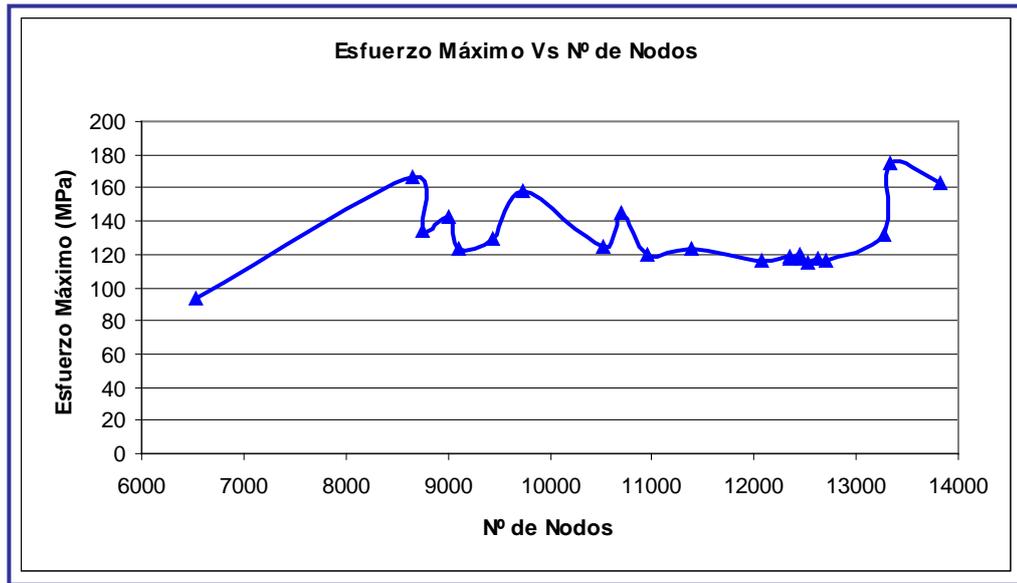


Figura IV.38: Esfuerzo Máximo Vs Nº de Nodos disco 24"

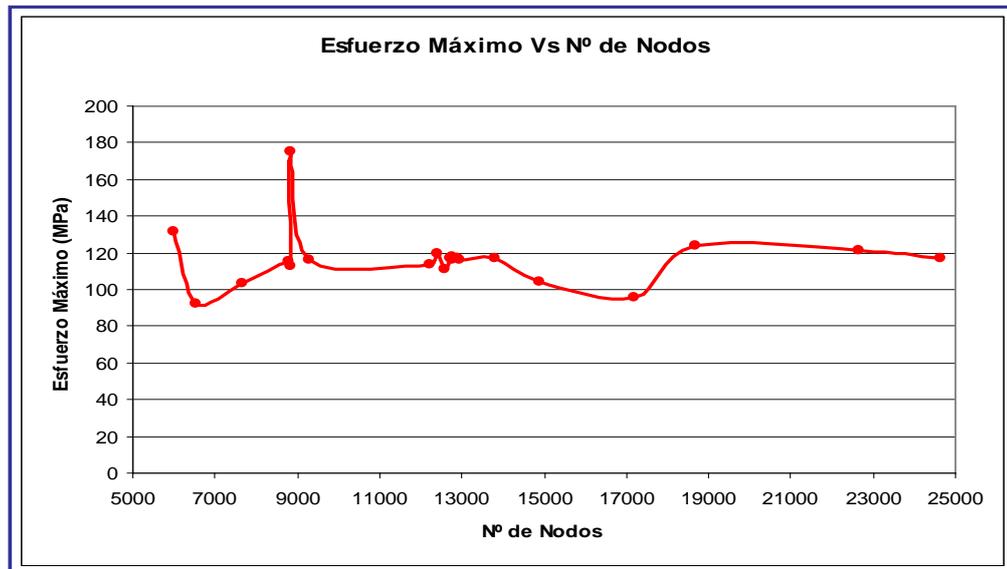


Figura IV.39: Esfuerzo Máximo Vs Nº de Nodos disco 30"



Al observar ambas gráficas se aprecia gran inestabilidad o alta variación del valor del esfuerzo máximo cuando el número de nodos del mallado se aleja del rango comprendido entre once mil (11000) y trece mil (13000) nodos. Para ambos discos, los valores de esfuerzo máximo arrojados por el programa en el rango de número de nodos que presentó mayor estabilidad se encuentra entre 115 y 117 MPa, valores superiores a la presión de operación especificada por el fabricante.

La figura a continuación muestra la distribución del esfuerzo producto de la carga de presión a la cual se encuentra sometida la superficie del disco de ruptura de 30 pulgadas, asimismo, el valor del esfuerzo máximo alcanzado.

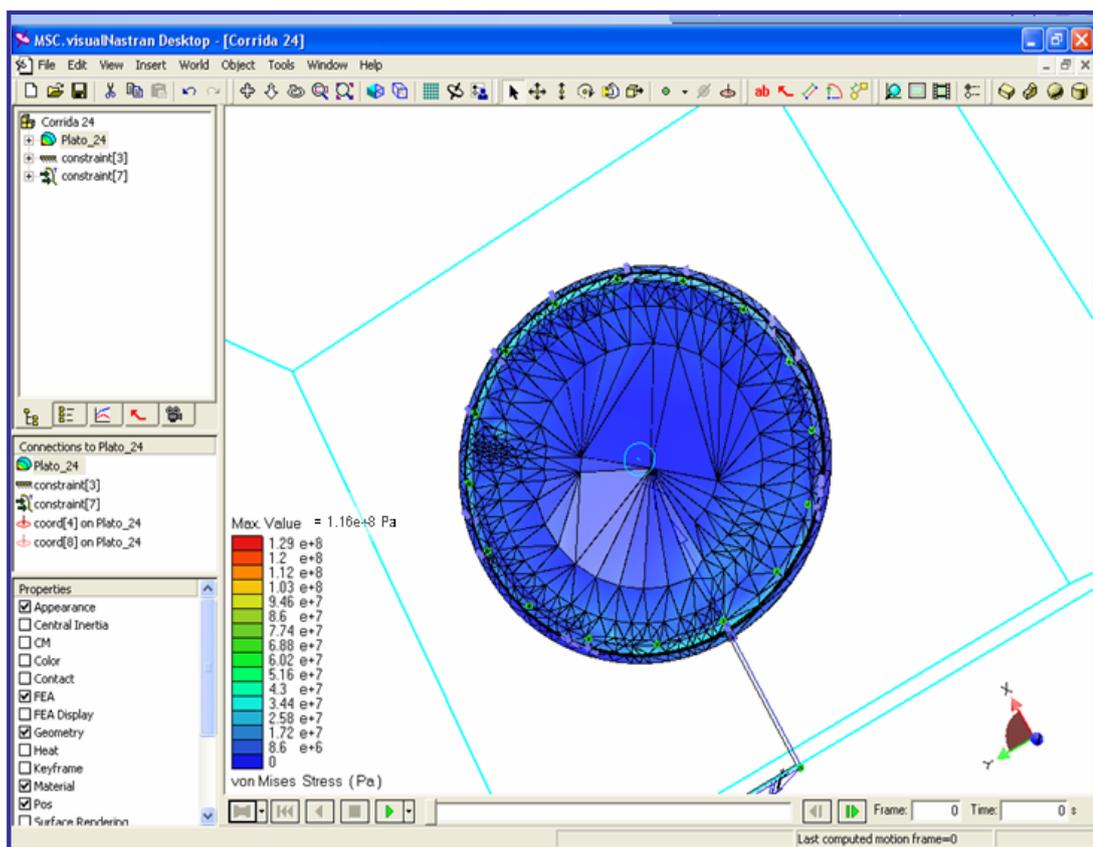


Figura IV.40: Esfuerzos debidos a las cargas de presión en disco de ruptura de 24 pulgadas. Fuente propia

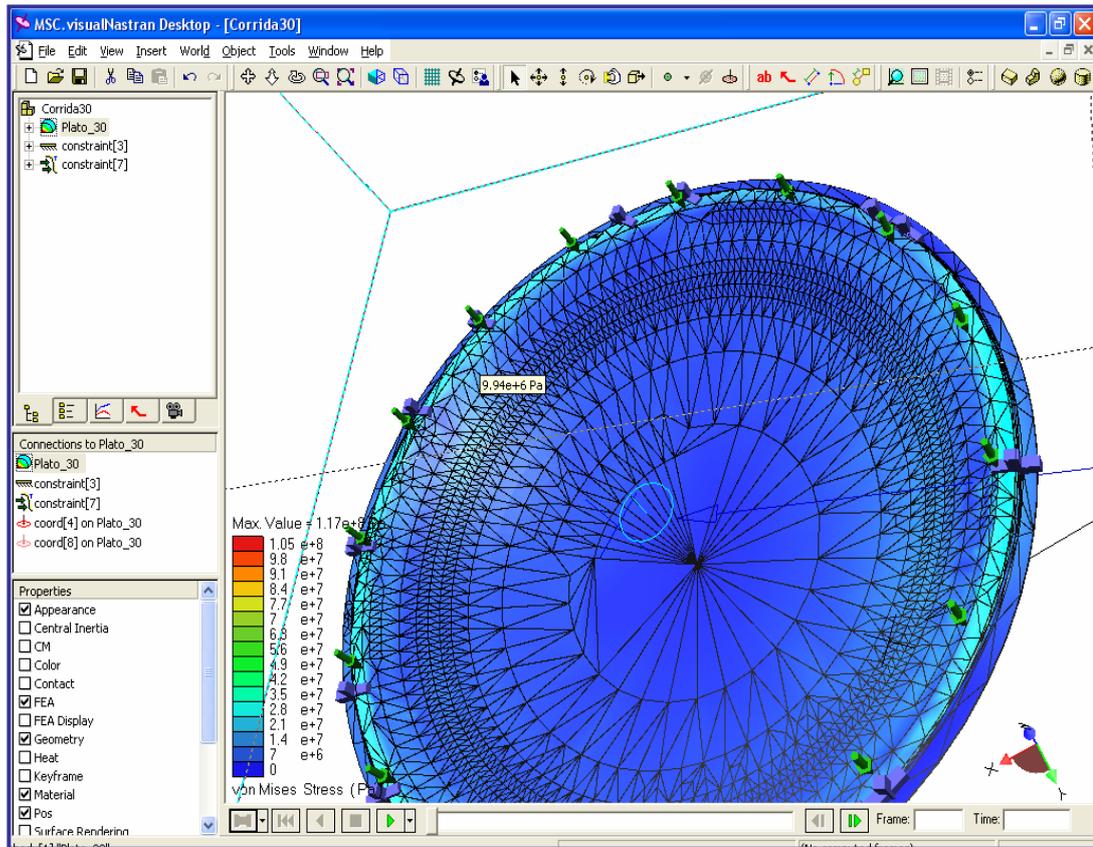


Figura IV.41: Esfuerzos debidos a las cargas de presión en disco de ruptura de 30 pulgadas. Fuente propia

4.8 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE LAS VÁLVULAS FV - 801 Y FV - 901 CORRESPONDIENTES A LAS ETAPAS 8 Y 9 DEL MECHURRIO B - 7351/ B - 7352.

Las válvulas FV - 801 y FV - 901 son válvulas tipo mariposa de 24 y 30 pulgadas de diámetro respectivamente. Su función es permitir el paso del caudal de gases de alivio hacia las etapas 8 y 9 cuando se alcance una determinada presión en el manifold de 36 pulgadas del mechorrio B – 7352.

Durante la investigación, se pudo conocer que el último mantenimiento que recibieron las válvulas FV - 801 y FV - 901, se realizó en la fecha en que fueron cambiados los discos de ruptura por última vez en el año 2006. Para ese momento



no se levantó un informe formal sobre las condiciones en las que fueron encontradas las válvulas y sobre los correctivos y tratamientos aplicados en dicho mantenimiento. Tampoco fue posible hallar durante la investigación, un historial de los mantenimientos realizados a las válvulas y tuberías en el período en que comenzó a detectarse la falla de los discos de ruptura. A continuación se presentan imágenes que reflejan el estado en el que se encontraban las válvulas, así como las tuberías en las que están instaladas.

En la Figura IV. 42 se observa la gran cantidad de partículas de óxido presentes en el fondo de la tuberías en las que se encuentran instaladas las válvulas FV - 801 y FV - 901.

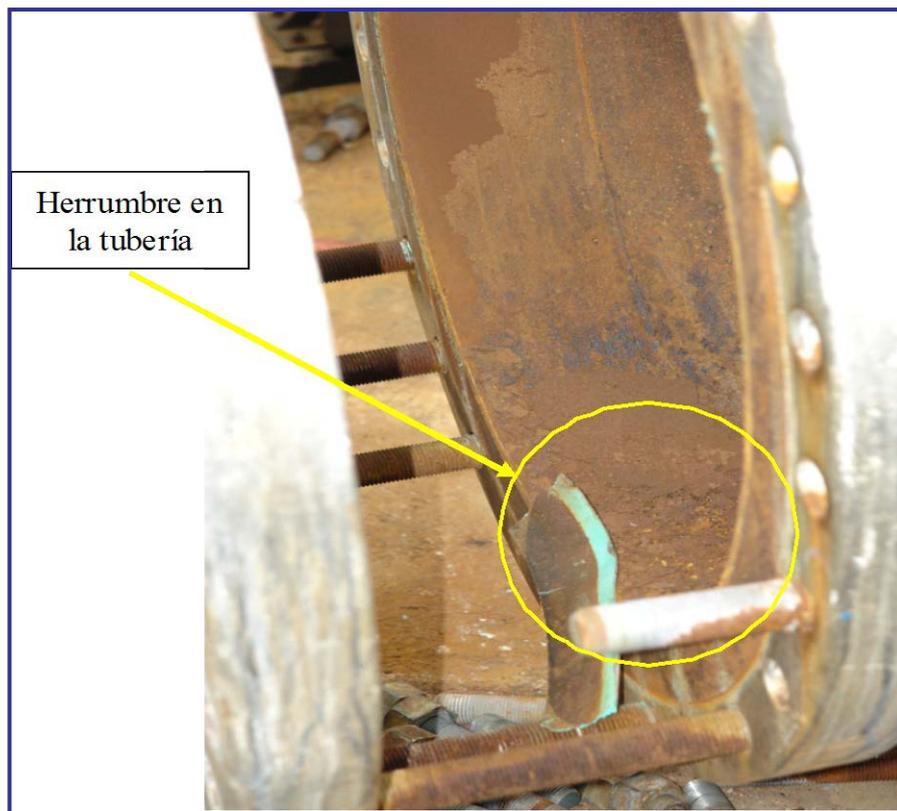


Figura IV. 42: Condiciones de las tuberías en las que se encuentran instaladas las válvulas FV – 801 y FV 901. Fuente PDVSA



En la próxima figura se observan las condiciones del piso, justo debajo de la tubería luego de retirar las válvulas.

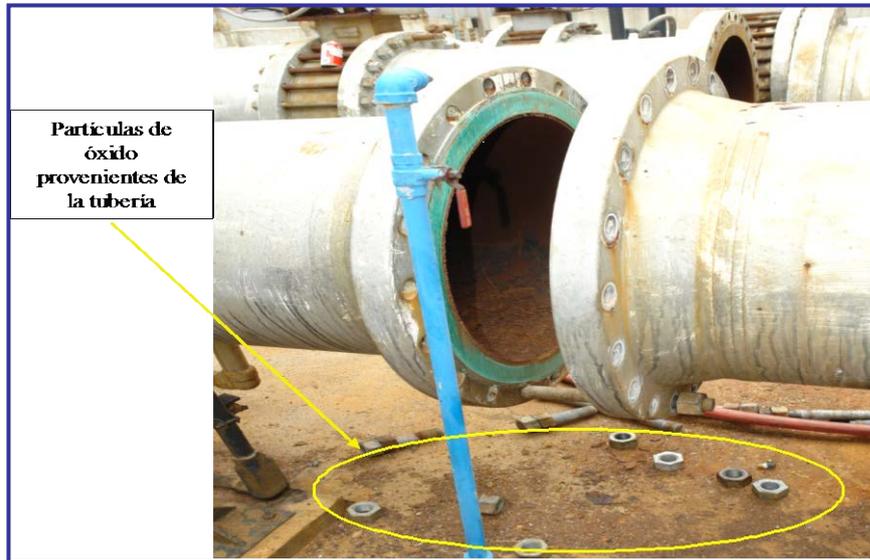


Figura IV.43: Restos de óxido en el piso, luego de retirar las válvulas. Fuente PDVSA

En el caso de las válvulas, se observa una capa de óxido sobre el asiento y el actuador.

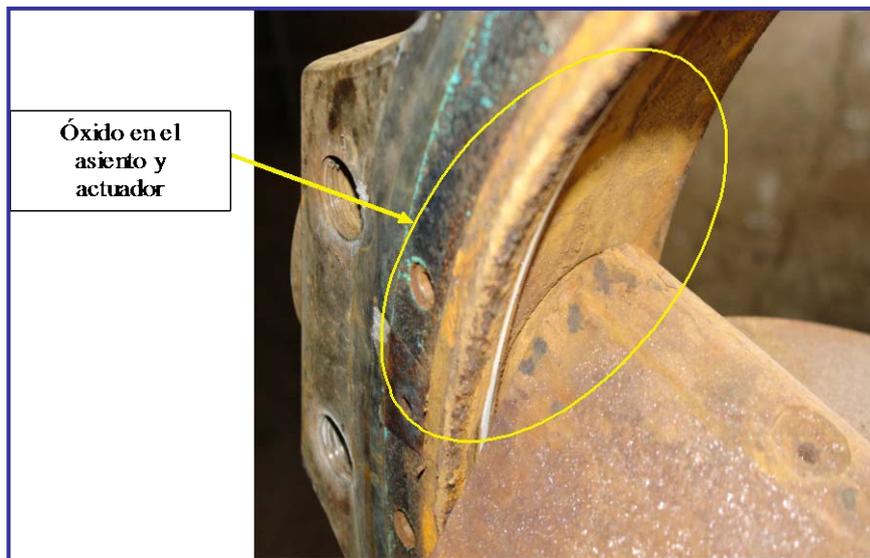


Figura IV.44: Condiciones del asiento y el actuador de las válvulas FV – 801 y FV – 901. Fuente PDVSA



Al realizar el giro del actuador, se observa la manera como se desprende la capa de óxido existente sobre ambas superficies.

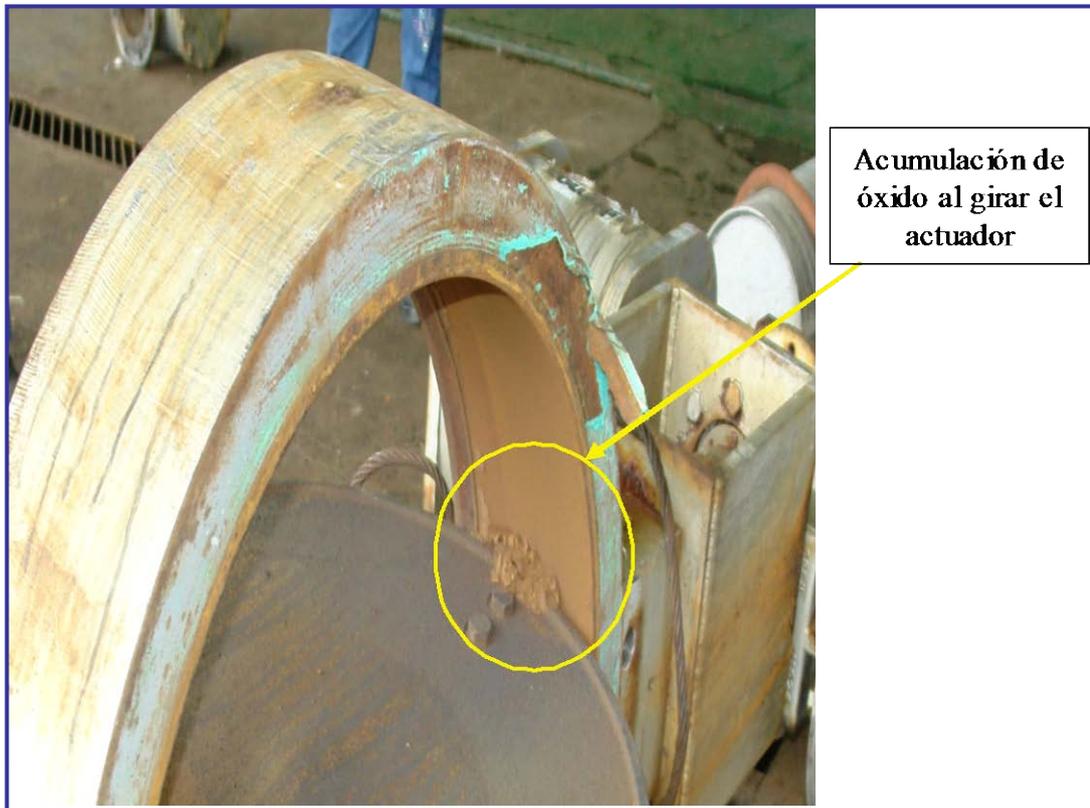


Figura IV.45: Acumulación de partículas entre el asiento y el actuador de las válvulas. Fuente PDVSA

4.9 ANÁLISIS DEL MATERIAL DE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Debido a la limitación que se presentó durante la investigación, representada por la ausencia de discos de ruptura en los almacenes de materiales de la empresa, con las características especificadas por la empresa diseñadora del mechorrio B – 7352, el análisis del material propuesto en los objetivos se apoyó en un estudio realizado por el Departamento de Inspección y Corrosión cuyos resultados fueron emitidos en fecha de 26/ 06/ 06, sobre muestras de discos que fallaron, a través del cual fue posible identificar el material con el que se encuentran fabricados los



discos que estaban instalados durante el mes de abril del mismo año, así como determinar las condiciones del material luego del evento de falla.

Para la realización de este estudio, la metodología de análisis empleada por el personal del Departamento de Inspección y Corrosión de la Refinería El Palito comprendió las actividades de:

- ❖ Inspección en campo.
- ❖ Selección de muestras.
- ❖ Montaje y preparación del análisis metalográfico.
- ❖ Análisis del material empleando el dispositivo INNOV – XSISTEMS.

Los resultados se exponen a continuación:

- ❖ La prueba de análisis químico realizado, permitió la identificación del material del disco como un acero inoxidable de la serie 300 austenítico, sin elementos estabilizadores. Los componentes se muestran en la Tabla IV.39.

Tabla IV.39: Material y componentes de las muestras de discos de ruptura estudiados por el Departamento de Inspección y Corrosión de REP

Material	Carbono	Cromo	Niquel	Molibdeno
SS 316L	0,03	16 - 18	10 - 14	2 - 3

Fuente Nota de Inspección y Corrosión sobre falla de material de los discos de ruptura del Mechurrio B – 7352

- ❖ Las estructura reflejadas luego del ataque químico con diferentes reactivos (Ácido Clorhídrico, Ácido Nítrico y Cloruro Férrico), sobre diferentes muestras



de los discos de 24 y 30 pulgadas, presentaron espineles de cromo y precipitaciones de carburo en los límites de grano (ver Figura IV.40).

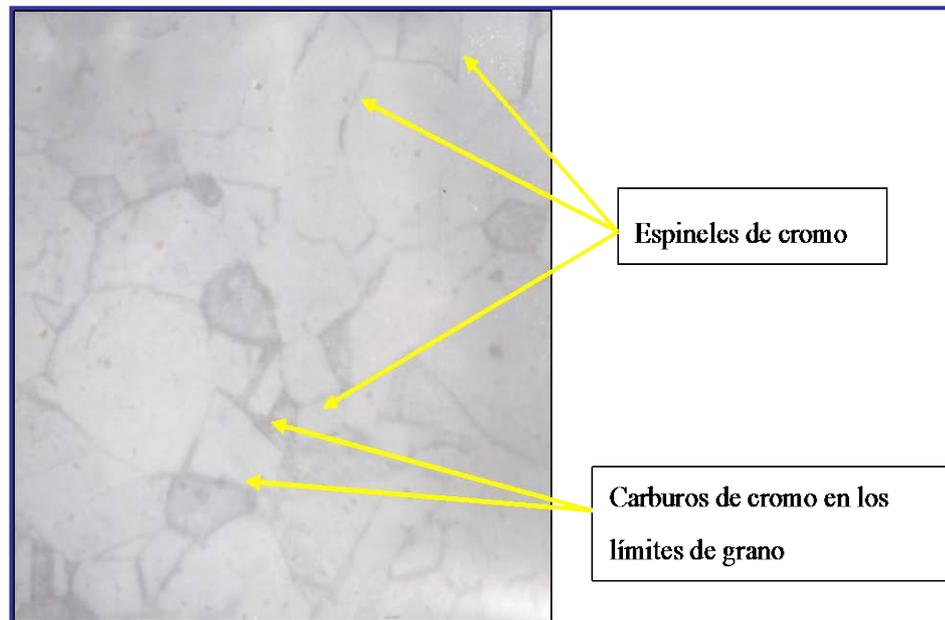


Figura IV.46: Microestructura: 1000x. Muestras de discos estudiados. Fuente Nota de Inspección y Corrosión sobre falla de material de los discos de ruptura del Mechurrio B – 7352

El análisis presentado en el informe, explica que la aparición de los espineles de cromo y los carburos de cromo en los límites de grano, es un fenómeno que tiene lugar en los aceros inoxidable austeníticos cuando se encuentran sometidos durante algún tiempo a temperaturas que varían de los 425 a los 850 °C, dicho fenómeno produce la sensibilización del material. La sensibilización resulta en la disminución del cromo en las zonas cercanas a los límites de grano del material, de esta forma se pierden las condiciones microestructurales originales de diseño, incrementándose en el material su susceptibilidad a la corrosión intergranular y fragilización en ciertos medios.



El grado de sensibilización, es decir, la cantidad de carburos de cromo formado en los límites de grano, depende del contenido de carbono del acero, la temperatura y el tiempo de exposición a la misma.

Como el material fue identificado como un acero inoxidable 316L, ya que el contenido de carbono es de 0,03%, las curvas de sensibilización de los aceros inoxidables en función del tiempo y la temperatura, indican que la ocurrencia de este fenómeno en este tipo de material tendría lugar al estar sometido a temperaturas sobre los 600 °C y tiempos prolongados sobre diez (10) horas. A continuación se muestran las gráficas de sensibilización del acero presentadas en el informe del Departamento de Inspección y Corrosión.

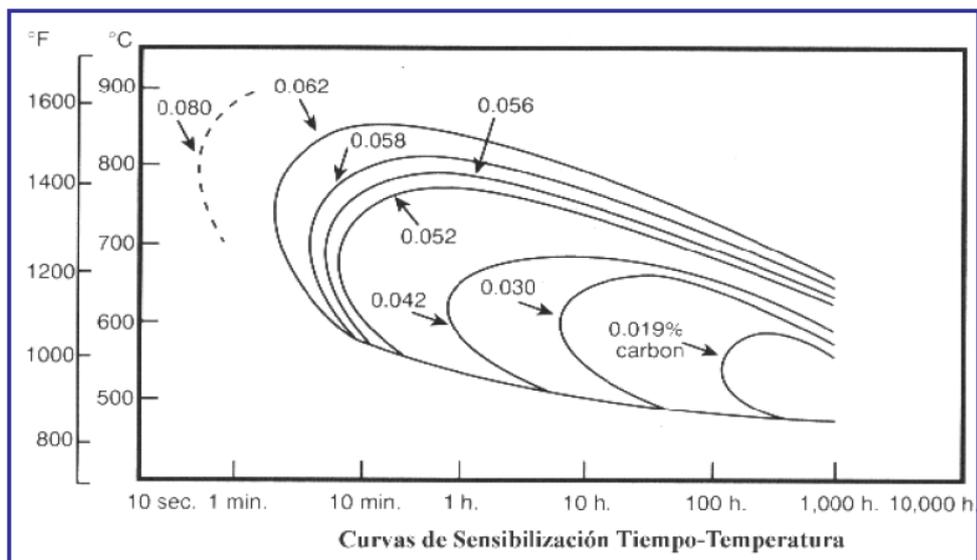


Figura IV.47: Curvas de sensibilización Tiempo – Temperatura para los Aceros Inoxidables.

Fuente Nota de Inspección y Corrosión sobre falla de material de los discos de ruptura del Mechurrio B – 7352

Después de observar y analizar los resultados, se concluyó que los discos habían sido sometidos a altas temperaturas durante un período prolongado lo que provocó la fragilización del material por precipitación de carburos de cromo en



los límites de grano y por ende la disminución de su ductilidad y resistencia al impacto.

4. 10 VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS.

A continuación el desglose de las ramas así como las matrices generadas para cada una ellas.

❖ Rama N° 1.

Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 1			
CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
OPERACIÓN DE B - 7351/ B - 7352 FUERA DE PARÁMETROS DE PROCESO	VARIABLES FUNDAMENTALES DEL PROCESO (PRESIÓN Y TEMPERATURA) FUERA DEL RANGO DE NORMALIDAD.	MEDICIÓN DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES (PRESIÓN Y TEMPERATURA) EN EL B - 7351/ B - 7352 DURANTE EL PROCESO DE ALIVIO DE GASES Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS CON LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL DOCUMENTO DE DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	LA PRESIÓN Y LA TEMPERATURA SE ENCUENTRAN DENTRO DE LOS RANGOS ESTABLECIDOS EN EL DOCUMENTO DESPRO SISTEMAS DE ALIVIO (DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ALIVIO DE GASES)

Figura IV.48. Matriz de Verificación de hipótesis Rama N° 1. Fuente PDVSA

De acuerdo a la respuesta obtenida, se descarta la hipótesis planteada para el modo de falla por operación del sistema de alivio de gases B - 7351/ B - 7352 fuera de los parámetros del proceso.



❖ Rama N° 2.

Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 2			
CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
DISCOS DE RUPTURA FUERA DE PARÁMETROS DE PROCESO	SELECCIÓN INADECUADA DEL DISCO POR PARTE DE LA EMPRESA DISEÑADORA DEL MECHURRIO B - 7351/ B - 7352	EVALUAR EL ESTADO DE CARGA POR PRESIÓN Y TEMPERATURA DE LOS DISCOS ESPECIFICADOS POR LA COMPAÑÍA DISEÑADORA DEL MECHURRIO B - 7352 CON LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DEL SISTEMA	LA TEMPERATURA NO ES FACTOR DETERMINANTE EN EL ESTADO DE CARGA DEL DISCO YA QUE ÉSTE FUE SELECCIONADO PARA OPERAR EN UN VALOR DE ESTA VARIABLE QUE SE ENCUENTRA DENTRO DE LOS PARÁMETROS NORMALES DEL SISTEMA. LA CARGA DEBIDA A LA PRESIÓN NO PRODUCE UN ESFUERZO SUFICIENTE PARA PROVOCAR LA RUPTURA DEL DISCO.

Figura IV. 49. Matriz de verificación de hipótesis rama N° 2. Fuente PDVSA

De acuerdo a la respuesta obtenida, se descarta la hipótesis de una selección inadecuada de los discos por parte de la empresa responsable del diseño del B – 7352 y asimismo se descarta el modo de falla por discos de ruptura fuera de parámetros de proceso.



❖ Rama N° 3.

Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 3

CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE LOS PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA SU INSTALACIÓN	INSTALACIÓN DEL DISCO EN SENTIDO CONTRARIO AL DE LA ESPECIFICACIÓN	BÚSQUEDA DE INFORMES DE REPOSICIÓN DE DISCOS FALLADOS, REALIZACIÓN DE ENTREVISTAS AL PERSONAL ENCARGADO DE LAS OPERACIONES DE REPOSICIÓN	EL PERSONAL ENTREVISTADO SEÑALÓ QUE EN CONSULTA CON LA EMPRESA FABRICANTE ESTA INDICA QUE AL INSTALAR UN DISCO EN SENTIDO CONTRARIO ESTE PUEDE FALLAR ANTE CUALQUIER VALOR DE PRESIÓN POR DEBAJO DE LA NOMINAL DE RUPTURA DEBIDO A QUE EL DISPOSITIVO ESTÁ DISEÑADO PARA SER COLOCADO EN UN SOLO SENTIDO. SE TOMÓ EN CUENTA ESTA CONDICIÓN EN LA ÚLTIMA INSTALACIÓN E IGUALMENTE FALLARON LOS DISCOS
INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE LOS PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA SU INSTALACIÓN	INSTALACIÓN DEL DISCO CON UN AJUSTE (TORQUE) FUERA DE LOS VALORES RECOMENDADOS POR EL FABRICANTE	BÚSQUEDA DE INFORMES DE REPOSICIÓN DE DISCOS FALLADOS, REALIZACIÓN DE ENTREVISTAS AL PERSONAL ENCARGADO DE LAS OPERACIONES DE REPOSICIÓN	SE TOMARON EN CONSIDERACIÓN LOS VALORES DE TORQUE RECOMENDADOS POR EL FABRICANTE DE LOS DISCOS SOLO EN LA ÚLTIMA INSTALACIÓN REALIZADA EN AGOSTO DEL AÑO 2006 E IGUALMENTE FALLARON LOS DISCOS A LOS TRES DÍAS DE HABER SIDO REEMPLAZADOS
INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE ESPECIFICACIÓN.	DISEÑO DEL DISCO DISTINTO AL DE LA ESPECIFICACIÓN	INSPECCIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS DISCOS INSTALADOS Y EN ALMACÉN Y COMPARACIÓN CON LAS DATA SHIT PRESENTES DEN EL MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL MECHURRIO	SE VERIFICA QUE LAS CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LOS DISCOS EN ALMACÉN Y LOS INSTALADOS NO COINCIDEN EN CUANTO AL TIPO ESPECIFICADO POR EL FABRICANTE
INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE ESPECIFICACIÓN.	MATERIALES DE FABRICACIÓN DEL DISCO DISTINTOS A LOS DE LA ESPECIFICACIÓN	INSPECCIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS DISCOS INSTALADOS Y EN ALMACÉN Y COMPARACIÓN CON LAS DATA SHIT PRESENTES DEN EL MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL MECHURRIO	SE VERIFICA QUE EL MATERIAL DEL SELLO QUE UTILIZA EL DISCO ESPECIFICADO POR EL FABRICANTE NO COINCIDE CON EL DE LOS DISCOS ENCONTRADOS EN ALAMCÉN Y LOS INSTALADOS
INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE ESPECIFICACIÓN.	PRESIÓN Y TEMPERATURA NOMINALES DE RUPTURA DEL DISCO DISTINTAS A LAS DE LA ESPECIFICACIÓN	INSPECCIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS DISCOS INSTALADOS Y EN ALMACÉN Y COMPARACIÓN CON LAS DATA SHIT PRESENTES DEN EL MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL MECHURRIO	SE VERIFICA QUE LA PRESIÓN NOMINAL DE RUPTURA DE LOS DISCOS ESPECIFICADOS POR EL FABRICANTE NO COINCIDE CON LA DE LOS DISCOS ENCONTRADOS EN ALMACÉN E INSTALADOS EN SITIO

Figura IV. 50: Matriz de verificación de hipótesis rama N° 3. Fuente PDVSA

Se descarta la hipótesis de falla por colocación en sentido contrario al indicado por el fabricante y se descarta la hipótesis de falla por ajuste (torque) fuera de especificación, por lo tanto el modo de falla por instalación del disco fuera de los parámetros recomendados. Se valida el modo de falla por instalación



de disco fuera de especificación al verificarse las tres hipótesis planteadas en este caso, a partir de lo cual se presume la realización de la compra de los discos de ruptura con una especificación errónea, la cual pudo verificarse al examinar las órdenes de compra de los mismos.

Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 3			
CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
INSTALACIÓN DE UN DISCO CON DAÑOS PREVIOS	DISCO DOBLADO, SUPERFICIE RAYADA O CORROIDA	INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO DE LOS DISCOS, DONDE PRESUMIBLEMENTE SE GENERAN LOS DAÑOS	EL ALMACENAMIENTO DE LOS DISCOS SE REALIZA DE MANERA TOTALMENTE INADECUADA Y CONTRARIA A LAS RECOMENDACIONES DE LOS FABRICANTES EN ESTE ASPECTO

Figura IV.51: Matriz de verificación de hipótesis rama N° 3 (continuación). Fuente PDVSA

Se valida el modo de falla por instalación de un disco con daños previos y se presume que estos daños son producto del almacenamiento inadecuado, la cual se verifica mediante la inspección de las condiciones de los discos en el almacén.



❖ Rama N° 4.

Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 4			
CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
APERTURA DE VÁLVULAS FV 801 Y FV 901 (ETAPAS 8 Y 9) NO DETECTADA POR OPERACIONES	VÁLVULAS DESCALIBRADAS	ENTREVISTAS CON EL PERSONAL DE INSTRUMENTACIÓN	EL PERSONAL ENTREVISTADO SEÑALA QUE LAS VÁLVULAS SE ENCUENTRAN CALIBRADAS EN LOS PUNTOS DE APERTURA Y CIERRE QUE APARECEN REFLEJADOS EN LA TABLA IV.2
PASE EN VÁLVULAS FV 801 Y FV 901	DESGASTE DE ACTUADOR Y ASIENTO	BÚSQUEDA DE INFORMES DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO E IMÁGENES DE LAS CONDICIONES DE LAS VÁLVULAS	NO EXISTEN LOS INFORMES SOBRE EL MANTENIMIENTO. LAS IMÁGENES ENCONTRADAS NO REFLEJAN UN DESGASTE CONSIDERABLE EN EL ACTUADOR Y EL ASIENTO, SIN EMBARGO SE OBSERVA UNA CAPA PRODUCTO DE LA ACUMULACIÓN DE PARTÍCULAS ENTRE EL ASIENTO Y EL ACTUADOR
PASE EN VÁLVULAS FV 801 Y FV 901	FALTA DE MANTENIMIENTO DE LAS TUBERÍAS EN LAS QUE SE ENCUENTRAN INSTALADAS LAS VÁLVULAS	BÚSQUEDA DE INFORMES DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO E IMÁGENES DE LAS CONDICIONES DE LAS TUBERÍAS	NO EXISTEN LOS INFORMES SOBRE EL MANTENIMIENTO. SIN EMBARGO LAS IMÁGENES REFLEJAN LA EXISTENCIA DE GRAN CANTIDAD DE HERRUMBRE Y PARTÍCULAS EN EL FONDO DE LA TUBERÍA
PASE EN VÁLVULAS FV 801 Y FV 901	MANTENIMIENTO INADECUADO DE LOS COMPONENTES DE LA VÁLVULA	BÚSQUEDA DE INFORMES DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO E IMÁGENES DE LAS CONDICIONES DE LAS VÁLVULAS	NO EXISTEN LOS INFORMES SOBRE EL MANTENIMIENTO. NO SE PUEDE ASEVERAR LA REALIZACIÓN DE ÉSTE DE MANERA INADECUADA

Figura IV.52: Matriz de verificación de hipótesis Rama N° 4. Fuente PDVSA

Se descarta la hipótesis de las válvulas descalibradas y así el modo de falla por apertura no detectada por el departamento de operaciones.

Se descarta la hipótesis de un mantenimiento realizado de manera inadecuada, sin embargo se verifica el mal estado de las tuberías que origina la acumulación de partículas entre el asiento y el actuador de la válvula afectando el cierre hermético de la misma y provocando un pase de gases a través de esta instalación,



hacia los quemadores asociados a las etapas 8 y 9 del mechorrio. Asimismo, no se descarta la hipótesis de falla por desgaste en el actuador y el asiento de las válvulas, ya que a pesar de la realización del mantenimiento de los mismos, los discos fallaron nuevamente.

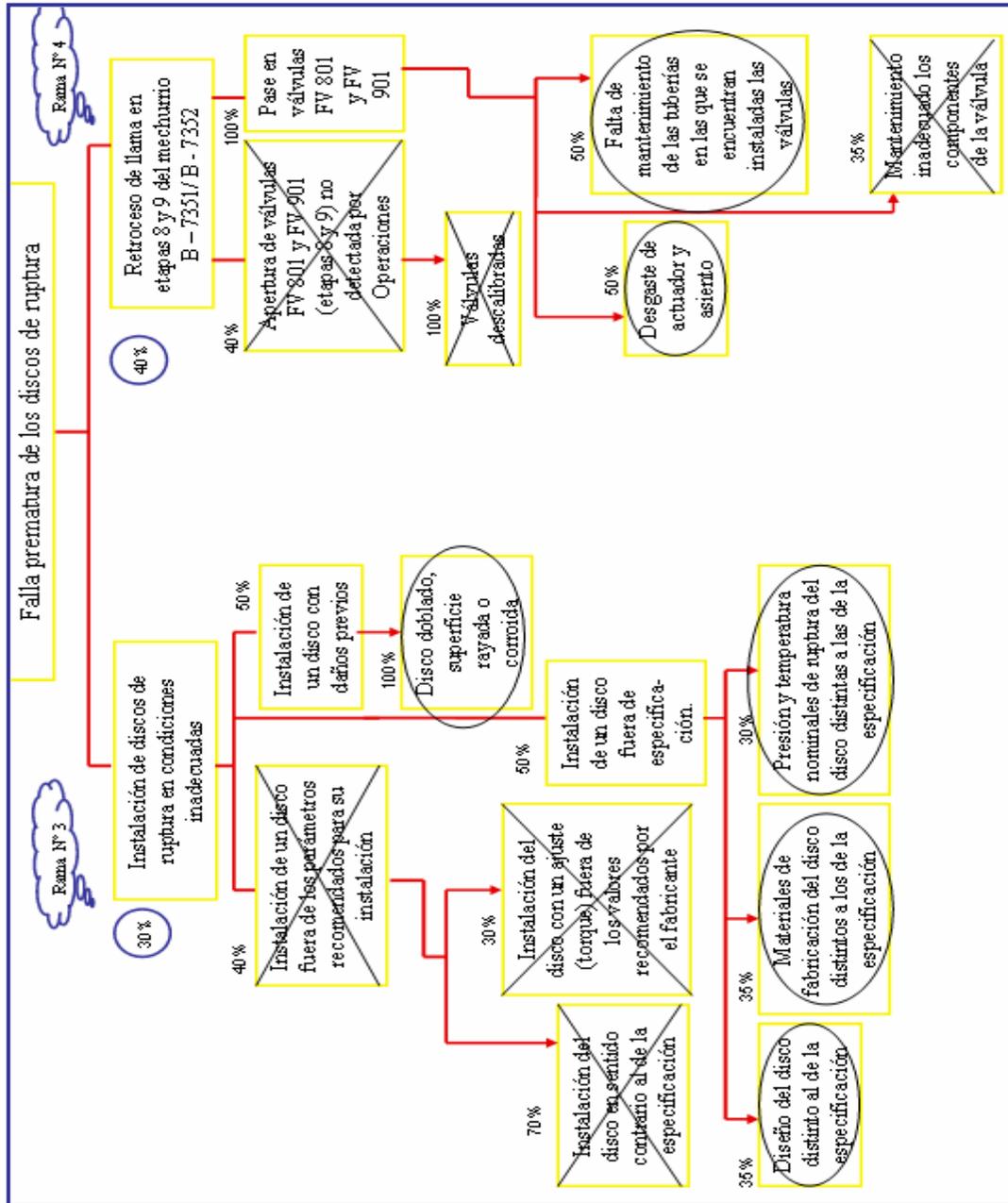


Figura IV. 53: Árbol Lógico de Fallas luego de la primera verificación de hipótesis. Fuente PDVSA



A través de la matriz de verificación también fue posible identificar las fallas humanas, las cuales se describen para cada una de las hipótesis que no fueron descartadas del árbol.

- ✓ Falla humana en la creación de las órdenes de compra de los discos de ruptura.

Tiene origen en la equivocación por parte del personal que crea las órdenes de compra de los discos de ruptura en la lectura de la hoja de datos anexa al manual de operación y mantenimiento del sistema de alivio, al no diferenciar el punto nominal de ruptura del dispositivo del punto de operación crítico de la línea donde este prestará servicio y al no conocer la nomenclatura del fabricante para identificar el diseño de los distintos tipos de disco, así como los materiales con los que se fabrican.

- ✓ Falla humana en el personal que labora en el almacén de los discos de ruptura.

Tiene origen en el desconocimiento por parte del personal de las recomendaciones generales de los fabricantes de los discos de ruptura sobre las condiciones apropiadas para su almacenamiento.

- ✓ Falla humana en el personal responsable del mantenimiento de las válvulas y las tuberías de las etapas 8 y 9 del mechurrio B - 7352.

Se incurre en la falla por omisión al no realizar informes sobre las actividades de mantenimiento de las válvulas con el fin de hacer un seguimiento de las condiciones en las que son encontradas al momento del desmontaje, las condiciones en las que son instaladas nuevamente, así como los períodos en los que se llevan a cabo los mantenimientos.



Las hipótesis validadas fueron sometidas nuevamente al proceso de verificación a través de la matriz. Los resultados fueron los siguientes:

Matriz de verificación de hipótesis			
CAMINO O RAMA RAÍZ	DESCRIPCIÓN HIPÓTESIS	MÉTODO DE VERIFICACIÓN	RESPUESTA OBTENIDA
INSTALACIÓN DE DISCOS DE RUPTURA EN CONDICIONES INADECUADAS	INSTALACIÓN DE UN DISCO CON DAÑOS PREVIOS	BÚSQUEDA DE INFORMES DE REPOSICIÓN DE DISCOS FALLADOS, REALIZACIÓN DE ENTREVISTAS AL PERSONAL ENCARGADO DE LAS OPERACIONES DE REPOSICIÓN, ESTUDIO DE LAS CONSECUENCIAS DE LA UTILIZACIÓN DE UN DISCO CON DAÑOS PREVIOS	SE ENCONTRARON FOTOGRAFÍAS TOMADAS A UN DISCO QUE REFLEJAN DAÑOS EN LA SUPERFICIE POR CORROSIÓN ANTES DE SER INSTALADOS. IGUALMENTE SE OBSERVAN RAYAS Y MARCAS EN LA SUPERFICIE. LOS FABRICANTES DE DISCOS DE RUPTURA NO GARANTIZAN UNA ACTUACIÓN ÓPTIMA SI SE INSTALA UN DISCO EN MALAS CONDICIONES
INSTALACIÓN DE DISCOS DE RUPTURA EN CONDICIONES INADECUADAS	INSTALACIÓN DE UN DISCO FUERA DE ESPECIFICACIÓN	COMPARAR PUNTO DE OPERACIÓN NOMINAL DE LOS DISCOS FUERA DE ESPECIFICACIÓN CON LAS VARIABLES DE OPERACIÓN FUNDAMENTALES DEL SISTEMA	EL PUNTO NOMINAL DE RUPTURA DE LOS DISCOS FUERA DE ESPECIFICACIÓN ESTÁ POR ENCIMA DE LOS VALORES NORMALES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA
RETROCESO DE LLAMA EN ETAPAS 8 Y 9 DEL MECHURRIO B - 7351/B - 7352	PASE EN VÁLVULAS FV 801 Y FV 901	ESTUDIO DEL EFECTO DEL PASE EN LAS VÁLVULAS SOBRE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ALIVIO	UN PASE EN LAS VÁLVULAS ORIGINA EMPAQUE DE GASES EN EL LADO DE LA TUBERÍA POSTERIOR A LA VÁLVULA, HACIA DONDE SE ENCUENTRAN LOS QUEMADORES. AL EMPACARSE LA TUBERÍA CON GASES Y ENCONTRARSE PERMANENTEMENTE ENCENDIDOS LOS PILOTOS, SE ENCIENDEN RÁPIDAMENTE LOS QUEMADORES. AL BAJAR LA PRESIÓN DE LOS GASES AGUAS ARRIBA DE LOS QUEMADORES, SE PRODUCE UN RETROCESO RÁPIDO DE LA LLAMA QUE IMPACTA AL DISCO Y LO EXPONE A ALTAS TEMPERATURAS, SE ENCONTRARON IMÁGENES E INFORMES QUE ASÍ LO DEMUESTRAN

Figura IV.54: Matriz de verificación de hipótesis. Fuente PDVSA

Se descarta la hipótesis de falla por instalación de disco fuera de especificación, se validan las hipótesis de falla por instalación de discos con daños previos, ya que no es posible garantizar una actuación óptima del disco de ruptura al ser instalado en mal estado, estableciéndose así como modo de falla la instalación de un disco en condiciones inadecuadas. Se valida la hipótesis de pase



en las válvulas FV – 801 y FV – 901 y así el modo de falla prematura por retroceso de llama en las etapas 8 y 9, evidenciado a través de las imágenes que reflejan las condiciones.

Al completar la verificación de las hipótesis, en el Árbol Lógico se identificaron dos modos que originan la falla por ruptura prematura de los discos.

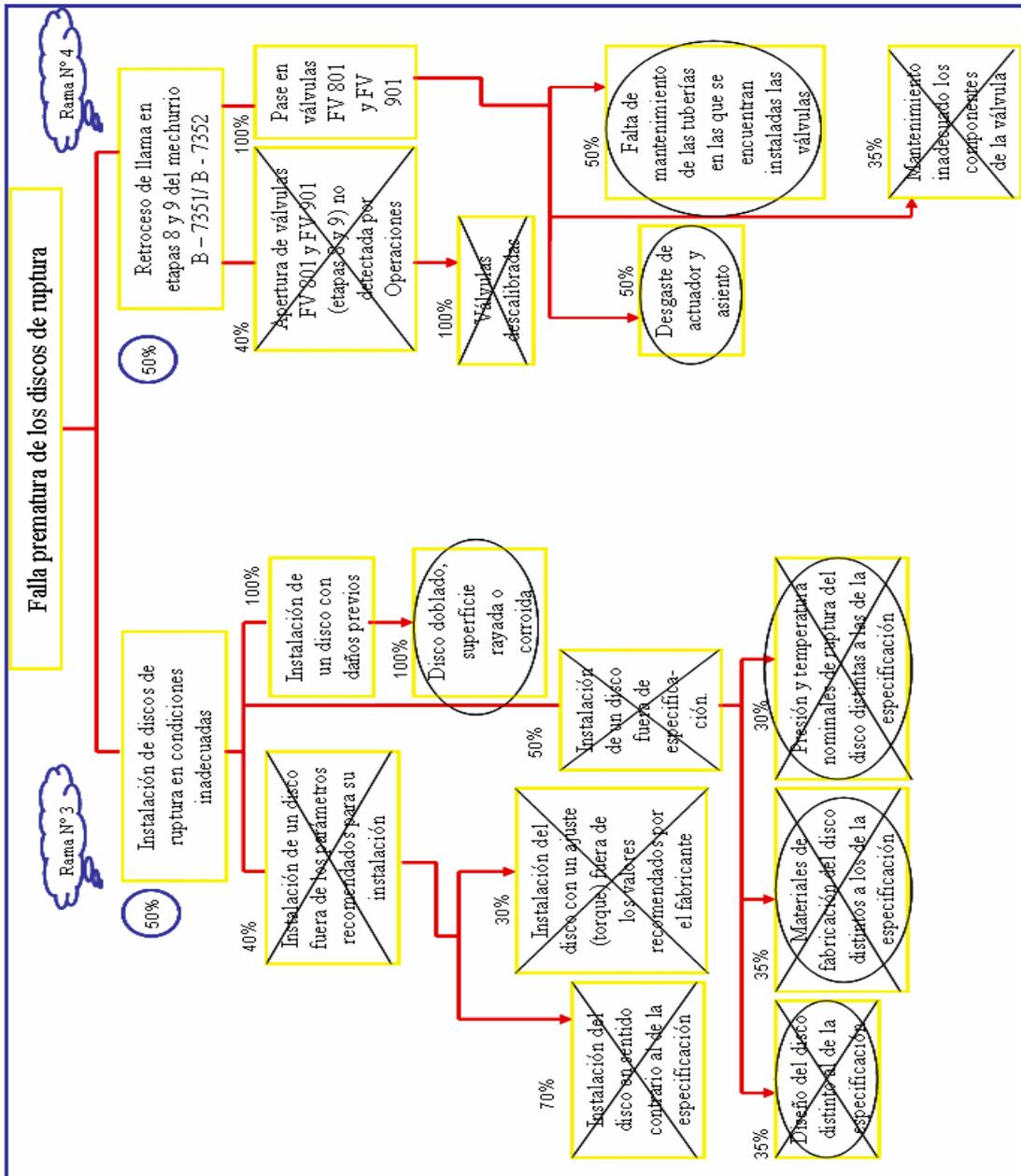


Figura IV.55: Árbol Lógico de Falla final. Fuente PDVSA



4.11 DIAGNÓSTICO DE FALLA.

La falla por ruptura prematura se debe principalmente a la instalación de discos con daños previos debido a un almacenamiento inadecuado y al retroceso de llama en las etapas 8 y 9 del mechorrio B – 7352, producto del pase en las válvulas de control de flujo de gases de alivio FV - 801 y FV - 901 hacia los quemadores. Sin embargo, durante la investigación realizada se detectaron gran cantidad de irregularidades relacionadas a los aspectos que se consideran en la utilización de discos de ruptura que disminuyen la confiabilidad, siendo estas:

- ❖ Falla en la creación de las órdenes de compra de los discos de ruptura.
- ❖ Falla en el almacenamiento inadecuado de los discos.
- ❖ Falla humana en el personal responsable del mantenimiento de las válvulas y las tuberías de las etapas 8 y 9 del mechorrio B - 7352.

Es por lo que deben tomarse acciones correctivas para asegurar que se cumplan todos los parámetros establecidos por la empresa diseñadora del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, tanto en la filosofía de diseño del sistema como en el dimensionamiento de los discos de ruptura.

4.12 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

Al realizar la identificación de las causas raíz físicas que son propiamente los modos de falla detectados, así como de las causas raíz humanas o fallas humanas que son el origen de la existencia de las causas raíz físicas, se propone una estrategia de solución integral a fin de corregir todas y cada una de las irregularidades descubiertas durante la verificación de hipótesis. Las acciones a tomar para lograr la corrección de las fallas se listan a continuación:

- ❖ Pase en las válvulas FV – 801 y FV – 901.



- ✓ Realizar una sustitución de las válvulas que se encuentran actualmente instaladas en las etapas 8 y 9 del mechorrio B – 7351/ B – 7352, considerando la instalación de válvulas que garanticen un elevado grado de hermeticidad. Se sugieren válvulas de grado de hermeticidad VI, según las normas ANSI/FCI 70 – 2 e IEC 60534 – 4 (ver Anexo G) y así evitar el pase que origina el retroceso de llamas desde los quemadores.
- ✓ Realizar limpieza y tratamiento de lavado interno a las tuberías asociadas a las etapas 8 y 9 del sistema de alivio, ya que las partículas que se desprenden de las mismas y se acumulan entre el asiento y el actuador de las válvulas de control de flujo, son las que permiten la formación de la capa que afecta la hermeticidad de las válvulas.
- ✓ Realizar un plan de mantenimiento preventivo a las válvulas basado en una data de seguimiento creada a partir de informes de las operaciones de mantenimiento, en los que aparezcan reflejadas las condiciones en las que se encuentran las válvulas e igualmente las tuberías, tratamientos y correctivos aplicados, condiciones alcanzadas al culminar el mantenimiento y por supuesto las fechas en las que son realizadas estas actividades.

❖ Instalación de discos de ruptura en condiciones inadecuadas.

- ✓ Bajo ningún motivo se deben instalar discos de ruptura que presenten en su superficie signos de corrosión, rayas, marcas, bordes doblados u otra señal de daño (ver anexos D y F), ya que de esta manera no se puede garantizar el buen funcionamiento de estos dispositivos, ni siquiera bajo condiciones de operación normales (presión y temperatura) del sistema.

Al verificarse que los daños que presentan los discos antes de la instalación son consecuencia del almacenamiento inadecuado, se debe capacitar al personal que labora en el Almacén N° 2 de Área Q, informándoles sobre las instrucciones de los fabricantes en este aspecto señaladas en el apartado 4.3.7 de este capítulo.



Igualmente, se debe considerar que los discos de ruptura tienen un tiempo de vida limitado en el almacén por lo que debe evitarse el envío de discos hacia la refinería de los cuales se desconozcan los datos de fecha de ingreso y fecha de compra.

Con respecto a las irregularidades detectadas en las actividades de compra de los discos de ruptura e instalación de los mismos, se señalan las siguientes acciones a tomar:

❖ Corregir las especificaciones de compra de los discos que se encuentran cargadas actualmente en el sistema SAP, ya que los parámetros que se señalan no corresponden a lo establecido por la empresa diseñadora del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, tanto en la filosofía de diseño como en las hojas de datos anexas al manual de operación y mantenimiento del mechorrio. Las especificaciones correspondientes en este aspecto, son las que se señalan en la Tabla IV.3 de este capítulo, en las que se hace referencia a las características de tipo de disco, material, tanto de la sección metálica como del sello, número de lote y punto de operación representado por la presión nominal de ruptura a la temperatura coincidente.

❖ En el momento de realizar la instalación de los discos, se deben tomar en cuenta las instrucciones del fabricante y ejecutar todas las acciones recomendadas por éste en lo que se refiere a la colocación del disco en el soporte, sentido de colocación de la unidad disco – soporte dentro de la tubería, patrón de aplicación de ajuste en las bridas y valores de torque a utilizar.



CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 PREPARANDO EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.

Al observar la línea del tiempo del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, es posible identificar que el arranque de las etapas del B – 7352 en junio de 2003 se realizó como consecuencia de una situación de contingencia provocada por el incendio ocurrido en las etapas del B – 7351. Para ese momento se encontraban concluidas todas las instalaciones del B - 7352, sin embargo nunca se hizo la entrega formal por parte de la compañía responsable, hecho que se ve reflejado en la ausencia de planos y documentos actualizados en la planoteca de la empresa, situación que pudo comprobarse durante la etapa de exploración, en la cual solo se encontraron los documentos relacionados al proyecto de expansión del mechurrio B – 7351.

También se observa que las instalaciones del B – 7352, sufrieron daños debido a que operó durante una parada no deseada en la unidad de FCC de la refinería, por lo que a solo un mes de haber sido colocado en servicio fue necesaria su parada para efectuar reparaciones, las cuales fueron concluidas en el año 2004.

Una vez que el equipo es colocado nuevamente en servicio en febrero de 2004, no se reportan fallas ni paradas hasta el año 2005 a partir del cual se cambian los discos en repetidas ocasiones sin presentarse eventos en los que se alcance la presión de ruptura especificada por el fabricante del disco. Dicha situación se repite continuamente hasta agosto de 2006, última fecha en que fueron reemplazados los discos y fallaron nuevamente, lo que provocó el bloqueo de las tuberías donde éstos se encuentran instalados a través de las válvulas manuales situadas en la misma.



5.2 ESTUDIO DE LAS INSTALACIONES DEL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.

Al comparar el diseño del mechurrio B – 7351/ B – 7352 instalado en la planta refinadora de crudo en la actualidad, con el diseño propuesto por John Zink Company según el OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR EL Palito Refinery Ground Flare B – 7351/ B – 7352, representados por las figuras IV.5 y IV.6 (página 61) del Capítulo IV, se aprecian diferencias importantes entre los mismos.

Se observa en campo el arreglo previsto para el B – 7352 según el diseño de John Zink, es decir, las etapas 8 y 9 que constituyen la ampliación del B - 7351, sin embargo las instalaciones de éste no presentan variación alguna respecto a las que se encontraban para el año 1998, por lo que las modificaciones especificadas la propuesta aceptada para el aumento de capacidad del sistema, explicadas en el Capítulo IV, no fueron realizadas. Actualmente, el mechurrio B - 7351 permanece operando con las siete etapas la 1, 1R, 2, 3, 4, 5, 6, 7A y 7B, lo que indica que no fue removida la etapa 7A y, a partir de la etapa 6, la regulación del paso de los gases continúa realizándose mediante el sello hidráulico o de agua.

La variación en la configuración del arreglo de tuberías y equipos que forman el sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, origina una diferencia en los valores de presión de operación de las etapas como se aprecia en las Tablas IV.1 y IV.2 (páginas 58 y 62 respectivamente), por lo que el equipo opera en condiciones fuera de diseño en cuanto a los puntos de consigna para la apertura y cierre de las válvulas.

5.3 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DE LOS DISCOS DE RUPTURA EN EL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.



De acuerdo a las especificaciones y recomendaciones de los fabricantes y a lo observado con respecto a las características de los discos de ruptura, las condiciones de instalación y las condiciones de almacenaje, se establece lo siguiente.

❖ Las características de los discos de ruptura especificadas por la empresa diseñadora del mechorrio B – 7352 señaladas en la Tabla IV.3 del Capítulo IV (página 63) y explicadas en la caracterización de los discos desarrollada en el mismo capítulo, presentan notables diferencias con respecto a las de los discos encontrados en el almacén, tal como se observa en la Figura IV.10 (página 67). En esta se aprecia que en el tag o etiqueta de identificación de los discos presentes en el almacén (únicamente de 24 pulgadas de diámetro), el tipo de disco es DV, no coincidiendo esto con la especificación de la empresa diseñadora del sistema de alivio, la cual indica la utilización de discos de ruptura tipo DVR debido a las condiciones del proceso en el que éstos prestan servicio (ver anexos A y B). El material FEP del sello que posee el disco encontrado en el almacén, no coincide con el del disco especificado por la empresa diseñadora TEF. El número de lote por el cual deben ser comprados los discos para asegurar su equivalencia con respecto a los del diseño original, no coincide con el número de lote especificado en el certificado de calidad original. La presión de ruptura indicada por el fabricante del disco es 9 psig @ 72°F, no coincidiendo ésta con la presión de ruptura indicada en el diseño del mechorrio B-7352, la cual es 14,25 psig @ 72°F (ver Anexo E).

❖ Al igual que los discos encontrados en el almacén, el que está instalado actualmente en la tubería de 24 pulgadas del sistema de alivio B – 7352 que se observa en la Figura IV.11 (página 68), presenta características que no coinciden con la JZ SPECIFICATION SHEET, RUPTURE DISC, PSE - 801 y el certificado de compra y calidad de BS & B Safety Systems anexos al John Zink



Company OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR El Palito Refinery Ground Flare B – 7351/ B – 7352 y a este trabajo (ver Anexo C). Se identificaron exactamente las mismas discrepancias existentes entre el tipo de disco que establece comprar el fabricante y los discos encontrados en el almacén de BARIVEN (ver Anexo E), lo que corrobora la instalación de un disco de este lote en el mechurrio B - 7352 a pesar de no cumplir con las características de operación que se requieren para esta aplicación. Sin embargo, no es posible establecer con certidumbre el número de ocasiones que esta situación ha ocurrido debido a que no existen informes o reportes que reseñen estas condiciones de instalación.

❖ Al estudiar las características de las órdenes de compra de los discos de ruptura, creadas en fecha 01 de abril de 2004 (ver Anexo E), se observa que para el disco de 24 pulgadas de diámetro las especificaciones técnicas de la orden de adquisición no coinciden con las señaladas por la empresa diseñadora del sistema de alivio. No se especifica el tipo de disco ni el material del sello del mismo. La presión de ruptura que se indica es 10 PSIG y no se hace referencia a la temperatura nominal de ruptura correspondiente, en su lugar se indica la temperatura de operación de la línea de la etapa 8 del mechurrio B – 7352 especificada por John Zink en la hoja de datos técnicos para la adquisición de los discos (ver Anexo E), la cual no es el parámetro que se debe señalar en este caso. Se indica el nombre del fabricante más no el número de catálogo, el cual según el OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR El Palito Refinery Ground Flare B – 7351/ B – 7352 es el CATALOG 77 – 3001 de BS & B Safety Systems.

En el caso del disco de ruptura de 30 pulgadas, se observa mayor coincidencia en las especificaciones, sin embargo, la presión de ruptura que se señala es 14,5 PSIG y no 14,25 PSIG y se indica un valor de 72 °F como temperatura de operación y no como temperatura nominal o coincidente de ruptura.



❖ Con respecto a las condiciones de instalación y de acuerdo a los resultados de la entrevista realizada a parte del personal involucrado en esta actividad, se observa que se ha realizado de manera inapropiada al no seguir las especificaciones y recomendaciones del fabricante en cuanto a los pasos previos a la instalación (ver Anexo D), los valores de torque a aplicar sobre los pernos de sujeción de la unidad disco – soporte y sentido de colocación de la misma en la tubería, sin embargo no se puede establecer exactamente el número de ocasiones en que esto ha ocurrido ya que no existen informes de las operaciones de reposición de los discos ni historiales de falla donde se haga una reseña sobre estos aspectos.

Por otra parte, se evidenció la utilización de discos con daños previos, lo que origina una condición crítica con respecto a la utilización de discos en condiciones inadecuadas, ya que ningún fabricante garantiza el buen funcionamiento de un dispositivo de este tipo al ser instalado en mal estado, por el contrario recomiendan evitar esta acción.

❖ Al comparar las condiciones en las que se encuentran almacenados los discos de ruptura con las especificaciones de los fabricantes para este aspecto (ver Anexo F), se aprecia que no se cumplen en ningún caso las medidas recomendadas para la conservación en buen estado de los dispositivos antes de su instalación. Por el contrario, el almacenamiento se realiza de manera precaria fuera de la envoltura original, por lo que los discos se encuentran constantemente expuestos a la polución y al contacto con partículas que ocasionan daños en su superficie, al ambiente corrosivo del almacén ubicado en las cercanías del mar y a los daños en su geometría, principalmente deformación de los bordes ocasionada por la colocación inadecuada de un disco sobre otro.



5.4 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS ACTUALES DEL SISTEMA DE ALIVIO B – 7351/ B – 7352.

De acuerdo a las mediciones realizadas de las variables fundamentales del proceso, presión y temperatura, en los puntos señalados en el Capítulo IV se observa lo siguiente sobre las condiciones de operación actuales del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352.

❖ Entrada del tambor separador de condensados (Cabezal 42 pulgadas, ver Figura I.1, página 4).

✓ El diagrama de los valores de presión a la entrada del tambor tomadas en el cabezal de 42 pulgadas, refleja que éstos oscilan entre 1,5 y 1,6 psig, lo cual está dentro de los valores de operación normales según lo descrito en el Capítulo I, donde se afirma que la presión de los gases de alivio para este cabezal debe ser positiva y mayor o igual a 8 pulgadas de agua (0,29 psig).

✓ En cuanto a la temperatura, las mediciones efectuadas en este punto reflejan un comportamiento con pocas variaciones alrededor de los 32 °C. Según lo descrito en el Capítulo I con respecto a esta variable, se encuentra en los valores normales pues se deben tener para el cabezal de 42 pulgadas temperaturas menores o iguales a los 100 °F (37,78 °C).

❖ Manifold de 24 pulgadas hacia las etapas 1 a 5 del B – 7351 (ver Figura I.1, página 4).

✓ El diagrama de los valores de presión en este punto refleja que éstos oscilan entre 1,2 y 1,5 psig, por lo que se encuentran dentro del rango de operación



normal del diseño del B – 7351 para el año 1998 antes de proponerse su modificación, según lo establecido en el Capítulo I con respecto al funcionamiento de este manifold (presión hasta 2,7 psig).

✓ La temperatura se encuentra entre los 100 y 98 °F (37,78 y 36,67 °C), lo que refleja un aumento de unos 5 °C respecto a la evaluada en la entrada del tambor separador D – 7351, debido a la ubicación del manifold en las cercanías de los quemadores, de los cuales se encuentran en servicio los que pertenecen a las etapas 1R, 1 y 2 para los valores de presión registrados en el manómetro instalado en este punto. Sin embargo, se observa que la temperatura no excede los 100 °F, establecido como el valor de operación normal según lo descrito en el Capítulo I del presente trabajo.

❖ Manifold de 36 pulgadas hacia las etapas 8 y 9 del B – 7352 (ver Figura I.1, página 4).

✓ El diagrama de los valores de presión en este punto refleja un comportamiento de poca oscilación alrededor de 1,4 psig, valores que se encuentran muy por debajo de la consigna de apertura de las válvulas que permiten el paso de los gases hacia los quemadores asociados a las mismas etapas por lo que se encuentran cerradas y los quemadores apagados. Dichos valores de presión también son mucho menores en relación a la presión nominal y extremos del rango de ruptura de los discos, incluso de aquellos que han sido instalados erróneamente con una presión nominal de ruptura de 9 psig como se describió anteriormente.

✓ La temperatura de los gases en este punto corresponde a la temperatura normal de operación del resto del sistema, ya que el flujo de los mismos hacia los quemadores de las etapas del B - 7352 se realiza sin la adición de ningún tipo de



energía que produzca un aumento en los valores de esta variable y los quemadores se encuentran apagados.

5.5 CÁLCULO DE CAUDAL, VELOCIDAD Y PRESIÓN EN LOS PUNTOS EN LOS QUE SE ENCUENTRAN INSTALADOS LOS DISCOS DE RUPTURA DEL MECHURRIO B – 7351/ B – 7352.

Al realizar el cálculo de las variables caudal, velocidad y presión de los gases en los puntos en los que se encuentran instalados los discos de ruptura, se observa lo siguiente:

- ❖ Por la tubería de 30 pulgadas de diámetro (etapa 9) circula un caudal de gases de alivio mayor que por la de 24 pulgadas (etapa 8). En el caso de la velocidad sucede lo contrario, por ser esta variable inversamente proporcional al área de la sección transversal, el flujo que circula por la tubería de 24 pulgadas lo hace más rápidamente que el de la tubería de 30, debido a que el área de la sección transversal de la primera es menor. Se observa que el régimen de circulación de los gases en las tuberías es a bajas velocidades debido a los bajos caudales en comparación a los máximos que pasarían por ellas en una condición de contingencia total.
- ❖ Con respecto a la presión que actúa sobre los discos de ruptura, esta ha sido determinada haciendo uso de la Ecuación III.1 (página 43) que representa el término de disponibilidad en el punto, dicha variable tiene el mismo valor para cada uno de los puntos en los que se encuentran instalados los discos. Al realizar el cálculo se observa que la presión sobre el disco de 30 pulgadas es mayor que la que actúa sobre el de 24; esto se debe a que al realizar el despeje de la variable, el término de la energía cinética que se resta a la disponibilidad del punto de



instalación del disco, tal como se muestra en el ejemplo de cálculo contenido el Capítulo IV (páginas 120 y 121), es mayor para la tubería de 24 pulgadas que para la de 30.

5.6 CÁLCULO DE LAS CARGAS PRODUCIDAS POR LA PRESIÓN SOBRE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Al conocer el valor de la presión en cada uno de los puntos en los que se ubican los discos y conforme a las condiciones de instalación y estado de esfuerzo al que se encuentran sometidos estos dispositivos, explicadas en los Capítulos III y IV, se determinó la carga que produce la presión sobre los discos de ruptura durante la operación de alivio de gases haciendo uso de la Ecuación III.9 (página 47). Según esta ecuación, la carga es directamente proporcional a la presión y al área enfrentada a la misma, por lo que para el disco de ruptura de 30 pulgadas la fuerza es mayor que para uno de 24, ya que ambos parámetros presión y área poseen valores mayores en el primer caso.

5.7 DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO SOBRE LOS DISCOS DE RUPTURA EN VISUAL NASTRAN.

Al observar la Figura IV. 40 (página 132), que representa la distribución del esfuerzo debido a la carga producto de la presión sobre el disco de 24 pulgadas de diámetro, se distingue que el área más esforzada corresponde a aquella cercana a los bordes del plato. Hacia el área central con la magnitud de la carga utilizada para la simulación, el esfuerzo es prácticamente nulo, lo cual puede apreciarse al comparar con la escala de color que representa los valores del mismo. En el caso del disco de 30 pulgadas, en la Figura IV.41 (página 133) se distingue una distribución del esfuerzo similar al anterior, incluso los valores máximos



alcanzados se encuentran comprendidos en ambos casos entre 115 y 117 MPa, debido a que ambos discos poseen la misma geometría y se encuentran bajo el mismo estado de carga.

5.8 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE LAS VÁLVULAS FV - 801 Y FV - 901 CORRESPONDIENTES A LAS ETAPAS 8 Y 9 DEL MECHURRIO B - 7351 - B - 7352.

Las imágenes encontradas de las condiciones de las válvulas cuando fueron desmontadas evidenció la falta de mantenimiento a las mismas y a las tuberías en las cuales se encuentran instaladas. El desgaste del actuador y el asiento es consecuencia igualmente de la falta de mantenimiento y atención sobre la actuación de estos dispositivos en el sistema de alivio.

5.9 ANÁLISIS DEL MATERIAL DE LOS DISCOS DE RUPTURA.

Al examinar el informe del análisis realizado sobre muestras de discos que han fallado, evidencia una vez más la instalación de estos dispositivos fabricados con un material distinto al especificado por la empresa responsable del diseño del B - 7352 el cual es el acero inoxidable 316, mientras que al realizar el examen de las probetas de los discos, el material fue identificado como un acero inoxidable 316L. A pesar de ello, el fenómeno de sensibilización que experimentaron estos discos tal como lo reseña el informe emitido por el Departamento de Inspección y Corrosión es común para todos los tipos de aceros inoxidables austeníticos, por lo que es válido para efectos de la descripción de las consecuencias de la exposición de los discos a altas temperaturas, hecho que quedó comprobado mediante el análisis metalográfico realizado y permitió validar el retroceso de llama desde los



quemadores asociados a las etapas 8 y 9 del sistema de alivio en estudio, como una de las causas principales de la falla por ruptura prematura de los discos.

5.10 VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS.

Esta actividad permitió la identificación de las causas raíz físicas de la falla prematura de los discos de ruptura como consecuencia de las causas raíz humanas o fallas humanas, debidas principalmente a los errores cometidos por equivocación y falta de información sobre todos y cada uno de los aspectos relacionados a la utilización de estos dispositivos como son la compra, el almacenamiento y el montaje, así como al descuido con relación a la actuación de las válvulas que controlan el pase de los gases hacia los quemadores.



- ❖ El estudio de las condiciones operativas actuales del sistema evidenció la operación dentro de los parámetros normales establecidos en el documento de descripción del proceso de alivio de gases, de acuerdo a los puntos de operación que se manejan para la instalación existente en la Refinería El Palito, a pesar de no coincidir esta configuración con la propuesta por la compañía John Zink durante la fase de diseño para aumento de capacidad del mechurrio B – 7351.

- ❖ El estado de carga por presión y temperatura al que se encuentran sometidos los discos de ruptura por las condiciones de operación del sistema, no es causa de la ruptura prematura de los mismos.

- ❖ El estudio de las condiciones de utilización de los discos de ruptura reveló la existencia de gran cantidad de irregularidades y fallas humanas en todas las actividades relacionadas a la utilización de los discos de ruptura, desde la compra y el almacenamiento hasta su instalación final en las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B – 7352, lo que si bien no es causa directa de la ruptura prematura de los mismos, evidentemente provoca un bajo nivel de confiabilidad sobre el buen funcionamiento de estos dispositivos.

- ❖ El estudio realizado sobre muestras de discos que fallaron reveló la exposición de los mismos a altas temperaturas lo que produce una sensibilización en el material de fabricación al precipitarse el carbono en los bordes del grano, generando así concentradores de esfuerzos.

- ❖ El evento de falla de los discos por ruptura prematura está asociado principalmente al retroceso de llamas ocasionado por un pase en las válvulas FV – 801 y FV – 901 de las etapas 8 y 9 del mechurrio B – 7351/ B – 7352 y a la utilización de discos de ruptura con daños previos a la instalación.



- ❖ El diagnóstico de la falla resultó certero y confiable debido a la aplicación de la herramienta del Análisis Causa Raíz a través de la cual se estudiaron todas las hipótesis, se presentaron las evidencias encontradas durante la investigación y se evaluaron ambas con la participación del personal de los distintos departamentos involucrados en el funcionamiento y mantenimiento del sistema de alivio B – 7351/ B – 7352.

- ❖ La estrategia de solución propuesta comprende la ejecución de una serie de acciones destinadas a la corrección de las causas raíz directas de la falla prematura de los discos, así como de aquellas actividades que se realizan de manera incorrecta, incumpliendo con las especificaciones de diseño del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352 y las especificaciones y recomendaciones de los fabricantes de los discos de ruptura.



- ❖ Ejecutar las acciones correctivas señaladas en la propuesta de solución a fin de evitar la repetición del evento de falla prematura de los discos de ruptura.

- ❖ Implementar programas de certificación de repuestos con la finalidad de evitar la adquisición o recepción de discos de ruptura fuera de los parámetros de calidad requeridos para su aplicación como sistema de seguridad y protección en el mechurrio B – 7351/ B – 7352. Asimismo, realizar periódicamente inventarios en el almacén para corroborar el tiempo de permanencia de los repuestos en el mismo.

- ❖ Comunicar los resultados de la investigación al personal de todos los departamentos involucrados en la operación y mantenimiento del sistema de alivio B – 7351/ B - 7352 e informar sobre la importancia de su participación en la aplicación de las herramientas de la Ingeniería de Confiabilidad en la solución de problemas.

- ❖ Implementar la instrumentación necesaria para realizar la lectura de los parámetros fundamentales del proceso (presión y temperatura) completamente desde la sala de control del área de Servicios Industriales, ya que la mayoría de los instrumentos existentes son indicadores locales y las tomas en las que se encuentran instalados son de difícil acceso. Cabe destacar que el área de los sistemas de alivio es de alto riesgo por lo cual no se debe permanecer por períodos de tiempo muy prolongados.

- ❖ Realizar estudios de la confiabilidad operacional de los discos de ruptura como equipos de protección de válvulas y comparar con otros dispositivos capaces de llevar a cabo la misma función bajo las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso de alivio de gases en la Refinería El Palito.



- ❖ Realizar la actualización de los documentos y planos relacionados al sistema de alivio B – 7351/ B – 7352, de acuerdo a las instalaciones actuales del mechurrio.

- ❖ Realizar planes de mantenimiento preventivo a las instalaciones y equipos que conforman el mechurrio B – 7351/ B – 7352.



- ❖ **By – pass:** Se refiere a la conexión típica en tuberías en paralelo para obtener una ruta para el paso de un determinado fluido, alterna a la principal.
- ❖ **Dispositivo INNOV - XSISTEMS:** Analizador de mano de Fluorescencia de Rayos-X que utiliza lo último en tecnología XRF. Un tubo de rayos-X en miniatura con ánodo de plata combinado con un detector en estado sólido SiPIN que produce resultados rápidos y exactos.
- ❖ **Flare:** Mechurrio.
- ❖ **Hierro Gamma γ :** Fase presente en todos los aceros que se forma entre los 911 °C y 1392 °C, presenta una estructura cúbica centrada en las caras.
- ❖ **Manifold:** Cabezal, colector.
- ❖ **PFE:** Politetrafluoretileno. Resina fluorocarbonada obtenida de la polimerización del tetrafluoretileno.
- ❖ **Pipe rack:** Conjunto de estructuras de soporte de tuberías.
- ❖ **Slops:** Residuos.
- ❖ **Switches:** Interruptores.
- ❖ **Tag de identificación:** Etiqueta de identificación.
- ❖ **TFE:** Tetrafluoretileno, tetrafluoroetano o perfluoroetileno. Compuesto químico formado por carbono y flúor con la fórmula molecular C_2F_4 . Se utiliza como materia prima en la preparación industrial de polímeros.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BS & B Safety Systems. *Bulletin 77 – 3001 Installation Instructions*.
- [2] BS & B Safety Systems. *Catalog 77 – 3001 Section C – 3 Composite Rupture Disks Type D*.
- [3] BRETO, Gerardo. *Manejo de Fluidos Teoría*. Universidad de Carabobo.
- [4] GREENE, Richard y otros. *Válvulas. Selección, uso y mantenimiento*. México: Editorial Mc Graw Hill.
- [5] HERNÁNDEZ, Roberto y otros. *Metodología de la investigación* (2º edición). México: Editorial Mc Graw Hill.
- [6] JOHN ZINK COMPANY. *Operation and maintenance manual for El Palito Refinery ground flare B – 7351/ B – 7352*. El Palito, 1998.
- [7] MARSTON. *Instrucciones de instalación y seguridad operativa. Discos de ruptura*.
- [8] PDVSA. *Descripción general de la operación y control del sistema de alivio de gases de la Refinería El Palito*.
- [9] SHIGLEY, Joseph y Larry Mitchell. *Diseño en Ingeniería Mecánica* (3º edición en español). México: Editorial Mc Graw Hill.
- [10] SMITH, W. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (3º edición). Colombia: Editorial Mc Graw Hill.



ARTÍCULOS ON LINE

[11] BOTTA, N. *El Accidente de Seveso*. Red Proteger. Higiene, Control y Seguridad.

Disponible en:

http://www.redproteger.com.ar/Escuela%20de%20Seguridad/Grandes_Accidentes/seveso_1976.htm#_ftn1

[12] TUMO, E. *NTP 456 Discos de Ruptura (I): Características*. Notas Técnicas de Prevención del Instituto de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

Disponible en: http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_456.htm

[13] TUMO, E. *NTP 457 Discos de Ruptura (II): Dimensionado*. Notas Técnicas de Prevención del Instituto de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

Disponible en http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_457.htm

[14] GARCÍA, O. *El Análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional*. Realibility World Latin América 2005, conferencia y exhibición.

Disponible en: <http://noria.com/sp/rw2005/memorias/ogarcia.pdf>

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

[15] <http://www.bsb.ie>

[16] <http://www.fike.com>

[17] <http://www.matweb.com>