

00521
126

**UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE QUÍMICA



**ANÁLISIS DE RIESGOS HAZOP, ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS Y DE
CONSECUENCIAS DEL CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO (PROPANO) DE UNA
PLANTA DESPARAFINADORA DE ACEITES PESADOS.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

REYNALDO RAMÍREZ MALDONADO



MÉXICO

**EXAMENES PROGRAMADOS
FACULTAD DE QUÍMICA**

2003

I



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACION

DISCONTINUA

Engineering and Technology / Vol. 13, No. 1, February 2001

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof. José Agustín Texta Mena

VOCAL: Prof. M. Javier Cruz Gómez

SECRETARIO: Prof. Néstor Noé López Castillo

1ER. SUPLENTE: Prof. Baldomero Pérez Gabriel

2DO. SUPLENTE: Profa. Miriam Guzmán Espinoza

LUGAR DONDE SE DESARROLLO ESTE TRABAJO:

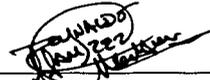
Laboratorio 212 del Edificio E de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM,
en la Ciudad Universitaria, México D.F.


Asesor de Tema:

Dr. M. Javier Cruz Gómez.


Supervisor Técnico:

I.Q. Alfredo Adrián Malvaez
Camacho.


Sustentante:

Reynaldo Ramírez Maldonado.

D E D I C A D O A :

La culminación y realización de este trabajo sólo se la dedico a una persona, la cual, aunque muchas veces no comprendo, sé que siempre esta apoyándome y a la cual le debo todo lo que a continuación menciono, todo lo que he vivido y todo lo que soy.

Entre otras cosas le debo unos padres que, aunque no han sido los mejores, con darme la vida han hecho más de lo necesario además de su buen esfuerzo, apoyo y cariño además de un par de hermanos que, aunque casi no se los demuestran, los quiero mucho. (¡gracias a Reynaldo Ramírez Ortega, Leticia Maldonado Alemán, Oscar y el desquiciante y leal Ariell).

Alguien que dejó honda huella en mi vida, de la cual tuve el honor de ser su nieto y a quién de forma muy especial le dedico este trabajo, por su dulzura, su amor, su apoyo y comprensión en todo momento, es a Rebeca Alemán Meneses, la cual, aunque ya no está aquí, sé que le dará mucho gusto ver la culminación de este trabajo, que también es de ella (eres la persona que en estos momentos más me hace falta).

No puedo dejar de nombrar a mis "padres y hermanos honorarios". Las Familias López Maldonado y González Chávez, los cuales además de ser buenos tíos y primos, han sido muchas veces confidentes y un buen apoyo para todo lo que me he propuesto (no puedo poner todos sus nombres, pero ustedes saben quienes son y en verdad que los aprecio mucho y los considero mis hermanos. ¡Gracias!).

Agradezco el honor de haber conocido a gente tan diversa y de gran calidad humana, pues puedo presumir que han sido en su momento excelentes compañeros y ahora son mejores como amigos. Los nombro por el orden en que aparecieron en mi vida y les doy las gracias por que en la mayoría de los casos han conocido lo peor de mí y a pesar de eso no me han dado la espalda:

Comienzo con Marco Antonio Andrade García e Isaf David Garcés Morales, pues sé que cuento con ellos cuando los necesite y de los cuales guardo muy gratos recuerdos de mi etapa de la primaria y de la secundaria. En particular les agradezco que todavía, después de tanto tiempo, me consideren su amigo.

Otras personas a las que puedo presumir como amigos y de los cuales me jacto de haber cursado la escuela preparatoria con ellos son el I.Q.M. Jesús Ortiz Méndez, el M.V.Z. Juan Carlos Hernández Herrera y el Lic. Mauricio Dávalos Alonzo, los cuales me han escuchado, apoyado y consolado en los momentos en los que ni yo mismo sé hacia donde me dirijo. Gracias por su lealtad y por su sinceridad ya que en muchas ocasiones, como la sangre que acude a la herida sin necesidad de que la llamen, ellos han estado a mi lado. ¡Chucho, Juanky y Borre el proyecto apenas va comenzando!

En la Facultad de Química conocí a muchas personas, las que en su mayoría no me interesó conocer, pero también conocí a personas de las que he aprendido mucho y de los cuales obtuve lo más valioso que podía obtener de ellas: su amistad. Sus nombres son:

Por supuesto, empiezo con el Poncho. El Q.A. Alonso Ortega Carrillo, de quién yo sé que va a llegar lejos. ¡Poncho, gracias por ser mi amigo y por hacer de nuestra amistad una base sólida con la cual siempre podré contar!

La Q.F.B. Andrea Ortega Calixto y la Q.A. Guadalupe Águilar, las cuales me han enseñado que la base de cualquiera amistad es la tolerancia y la lealtad. ¡Gracias chavas! Andy y Guadra, por ayudarme y creer las veces en las que ni yo creía en mí.

La I.Q. Irma Luz Almeida Carbajal qué me dio la oportunidad de entablar con ella una hermosa amistad. La excelente mancuerna que formamos tú y yo, sobre todo en el último semestre, jamás lo voy a olvidar. ¡Espero que tú tampoco te olvides de mí, Crucecita!

La I.Q. Magali Estudillo Clavería, a quién respeto y admiro por qué sé que con ella puedo platicarle cualquier cosa y siempre me va a escuchar. Maggy gracias por ser mi amiga, y como siempre lo he dicho, si pudiera tener una hermana: ¡me gustaría que fueras tú!

No puedo dejar de mencionar al Q.F.B. René Manjarrez Figueroa, de quién puedo en cualquier momento, contar con su apoyo. ¡Gracias Rana por todo el apoyo y los consejos que me has dado!

Otra persona que quiero mucho y que ha sido una amistad incondicional es la Q.A. Violeta Vázquez Alejandro. Te reitero mi admiración a tu persona. ¡Viole, gracias por ser cómo eres pero sobre todo por ser mi amiga!

A la Q.A. Thania Raquel Amaro Orozco, quien ha sido una muy buena amiga desde que la conozco, y de la cual puedo decir que es alguien muy apreciable para mí. ¡Güerita, te quiero mucho y espero que jamás dejemos de ser amigos!

La gente con la cual laboré también es de gran importancia pues me han demostrado que es gente preparada y que, mejor que eso, me estiman. Personas como Miguel A. Rodríguez, Claudia Martínez, Edgar Martínez, Jessica Domínguez, Cristina Viruel, Fanny M. Llamas, Esmeralda Ramírez, Saúl Rodríguez, Susana Ortiz, Sonia Monroy y Paola Quintero, de los cuales he aprendido y qué estimo. ¡Les agradezco que los momentos de trabajo los hayan hecho muy placenteros, pero sobre todo les agradezco que hayan confiado en mí y que me honren con su amistad!

A la I.Q. Sonia Torres Guzmán, por qué ha creído en mí, además de soportarme y darme su sinceridad. Gracias por dejarme conocer parte de ti y por qué se qué cuando te necesite siempre vas a estar a mi lado. ¡Sony, gracias por tu amistad y por ser parte de mi historia, nunca dejes de ser tan tierna!

No puedo dejar de nombrar al I.Q. Cruz Antonio Arredondo Guerrero, con quién tuve la fortuna de trabajar y quién me enseñó que si hay algo valioso es la lealtad y la sinceridad. ¡Gracias Toño por qué lo que tenías que decir siempre lo decías de frente, por qué no te dejás de nada ni de nadie!

De forma muy especial agradezco el poder coincidir con una persona a la que no solo quiero, sino que admiro por ser como es y por su inteligencia: la I.Q. Adriana Armenta Domínguez, quién ha sido una maravillosa compañía desde que la conozco. ¡Adrix, gracias por enseñarme qué lo bueno viene en envases pequeños y por tenerme la confianza que me has tenido! Peque, tu sabes cuanto te quiero.

Algo que agradezco infinitamente es el haber nacido en este país: México, del cual debo el orgullo de pertenecer y ser egresado de su universidad, una de las mejores del planeta: la Universidad Nacional Autónoma de México. ¡Sé que no les fallaré!

Agradezco los comentarios mal intencionados de todos aquellos que los han hecho con o sin motivo. Han sido un buen impulso, sin duda. Ahora sé que "cuando los perros ladran... es por qué estamos galopando". Además, si supieran lo que yo pienso de ellos... hablarían peor de mí.

Por todo esto, lo menos que puedo hacer es dedicarte a ti la consolidación de este trabajo. De veras qué muchas gracias por darme la oportunidad de vivir, por todas las cosas buenas que he tenido, por no dejarme solo y por dejarme continuar. ¡Gracias Señor, de verdad, gracias!

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

De forma muy especial agradezco la oportunidad que me brindo el Dr. Modesto Javier Cruz Gómez, ya que como dice él, estamos aportando un granito de arena para preservar los recursos energéticos de nuestro país. Estamos haciendo patria. ¡Doc gracias por enseñarme que en la vida y para todo hay que tener carácter y estrategia, y que cuando haya que prescindir de alguna de estas cosas, que no sea del carácter!

Al Maestro en Ciencias Néstor Noé López Castillo que revisó este trabajo. Por que se interesó en mi trabajo y por que sus comentarios a mí persona siempre los he sentido leales y sobre todo, muy divertidos. ¡Ness, gracias por tu tolerancia y tu preocupación!. Eres un gran ser humano.

A la Refinería de PEMEX en Salamanca, Gto., por dejarme entrar a sus instalaciones y conocer de cerca esa industria que tantos allibajos ha tenido, pero que es la más leal de nuestra nación. Gracias a la Refinería "Ing. Antonio M. Amor", pues me enseñó a querer a la industria más exitosa que ha tenido México.

Reginaldo Ramírez Maldonado

ÍNDICE.

	Página
JURADO ASIGNADO.....	I
DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS.....	II
INDICES.....	VI
LISTAS DE ABREVIATURAS.....	XII

CAPÍTULO UNO: INTRODUCCIÓN.

INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	6
ETAPAS DEL PROYECTO.....	7

CAPÍTULO DOS: PERSPECTIVA TEÓRICA.

II.A. LOS RIESGOS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA.....	9
II.B. ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LOS ACCIDENTES.....	13
II.C. TRABAJO Y PREPARACIÓN PREVIOS AL ANÁLISIS DE RIESGOS.....	15
II.D. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	18
II.D.1. METAS, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ANÁLISIS DE RIESGOS.....	19
II.D.2. INTERPRETACIÓN DEL RIESGO.....	21
II.D.3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE RIESGO.....	22
II.D.4. ASUMIR EL RIESGO.....	24
II.D.5. ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS.....	24
II.E. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RIESGO.....	26
II.E.1. MÉTODOS COMPARATIVOS.....	26
i. Códigos, estándares y normas.....	27
ii. Listas de verificación o comprobación (checklist).....	27
iii. Análisis histórico de accidentes.....	29
II.E.2. ÍNDICES DE RIESGOS.....	30
i. Índice Dow (de incendio y explosión).....	30
ii. Índice de Incendio, Explosividad y Toxicidad (Mond).....	33
II.E.3. MÉTODOS GENERALIZADOS.....	34
i. Análisis de modos de fallas y sus efectos (FMEA).....	34
ii. Análisis de árbol de sucesos (ETA).....	35
iii. Análisis de error humano.....	36

iv.	Análisis "What-if?" ("¿Qué pasa si...?").....	37
v.	Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP, por sus siglas en inglés).....	38
	Metodología para el estudio HAZOP.....	40
vi.	Análisis por Árbol de Fallas (FTA).....	48
	Metodología para el Análisis de Árbol de Fallas.....	49
vii.	Análisis de Consecuencias o Efectos.....	52
II.F.	MODELOS PARA ANÁLISIS DE RIESGOS.....	53
II.F.1	ECUACIONES DE MODELAMIENTO.....	54
i.	Modelos para Límites de Inflamabilidad.....	54
ii.	Modelos para mezclas de vapores inflamables.....	55
iii.	Evaluación de daños provocados por Nubes Explosivas.....	55
	Cálculo del peso de material en el sistema. (Wg o Wl).....	56
	Cálculo del peso de material en la nube.....	57
	Cálculo del diámetro de la nube formada.....	58
	Cálculo de la energía desprendida por la explosión.....	59
	Determinación del diámetro de las ondas expansivas.....	59
	Determinación de los daños ocasionados.....	60

CAPÍTULO TRES. TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.

REFINACIÓN DEL PETRÓLEO.....	62	
III.A. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: LA PLANTA DESPARAFINADORA.....	63	
III.A.1. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO DE LA PLANTA DESPARAFINADORA.....	64	
i.	Recepción y Mezcla de Solventes.....	64
ii.	Sección de enfriamiento de la carga de aceite.....	65
iii.	Filtros continuos deparafinadores.....	66
iv.	Sección de enfriamiento de la mezcla de parafina primaria.....	68
v.	Filtración fraccionada de parafina.....	68
vi.	Filtración de repaso.....	69
vii.	Enfriamiento de solvente con propano.....	69
viii.	Sistema de recuperación de solvente.....	71
ix.	Generación de gas inerte, circulación y enfriamiento.....	78
x.	Circulación de gas inerte.....	78
xi.	Flujo de refrigerante.....	83
III.B. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	86	
i.	Metodología empleada.....	86
ii.	Descripción del circuito de enfriamiento con propano.....	83
iii.	Análisis HAZOP.....	85

	Recomendaciones del estudio HAZOP.....	105
iv.	Análisis del Árbol de Fallas.....	108
	Recomendaciones del Análisis de Árbol de Fallas.....	109
v.	Análisis de Consecuencias.....	109
	Evaluación de efectos de incendio y explosión.....	122
	Resultados del análisis de consecuencias.....	123
	Recomendaciones del análisis de consecuencias.....	125

CAPÍTULO CUATRO. CONCLUSIONES.

	CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS HAZOP.....	128
	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS.....	128
	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.....	129
	CONCLUSIONES GENERALES.....	133

APÉNDICES.

APÉNDICE A.	GLOSARIO DE TÉRMINOS USADOS EN LAS TÉCNICAS PARA ANÁLISIS DE RIESGO.....	136
APÉNDICE B.	MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL ÁRBOL DE FALLAS POR EL MÉTODO DE CONJUNTOS MÍNIMOS.....	140
APÉNDICE C.	TÉRMINOS USADOS EN EL ESTUDIO DE ACCIDENTES CON FUEGO.....	142
APÉNDICE D.	HOJAS DE SEGURIDAD DE SUSTANCIAS.....	152

BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA.....	159
-------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla II.1.	Causas más frecuentes de accidentes en la Industria Química y sus porcentajes de recurrencias aproximados.....	9
Tabla II.2.	Accidentes industriales mayores a nivel mundial a partir de 1974.....	12
Tabla II.3.	Resultados de Eventos Intermedios (propagantes y de reducción de riesgo).....	14
Tabla II.4.	Factores de Riesgo para los accidentes de proceso.....	15
Tabla II.5.	Clasificación de Riesgos y sus características.....	19
Tabla II.6.	Clasificación de las Técnicas de Análisis de Riesgos.....	27
Tabla II.7.	Bancos de datos de Accidentes para Análisis Históricos.....	31
Tabla II.8.	Palabras Guía utilizadas en el Análisis HAZOP.....	43
Tabla II.9.	Matriz generalizada de desviaciones detectadas en el Análisis HAZOP.....	44
Tabla II.10.	Clasificación de los Niveles de Frecuencia.....	45
Tabla II.11.	Clasificación de los Niveles de Gravedad.....	45
Tabla II.12.	Clasificación de las recomendaciones generadas en el Análisis y utilizadas en la Matriz de Riesgos.....	46
Tabla II.13.	Nombres, usos y símbolos de las compuertas lógicas usadas en un Árbol de fallas.....	51
Tabla II.14.	Relación de distancia escalada y Presión en una explosión.....	60
Tabla III.1.	Recomendaciones del Análisis HAZOP.....	91
Tabla III.2.	Descripción del escenario considerado para el análisis de Árbol de Fallas.....	108
Tabla III.3.	Causas y recomendaciones generadas por el Análisis de Fallas.....	110
Tabla III.4.	Composición de la carga en la línea 80-LG-70-B.....	122
Tabla III.5.	Datos generales usados en el Programa PHAST Professional.....	123
Tabla III.6.	Datos generales del tanque contenedor de Propano líquido.....	123
Tabla III.7.	Datos generales de la descarga de Propano.....	123
Tabla III.8.	Datos generales de la dispersión de Material (Propano).....	124
Tabla III.9.	Relación de la Radiación y la distancia por la explosión de la nube inflamable.....	124
Tabla III.10.	Relación de la distancia y Sobrepresión generada por la explosión de la nube inflamable.....	125
Tabla III.11.	Datos de la BLEVE producida en el contenedor de propano D-321.....	125
Tabla IV.1.	Posibles efectos de la explosión de nube inflamable.....	134

Tabla B.1.	Reglas booleanas de uso frecuente en el Análisis de Árbol de fallas.....	140
Tabla B.2.	Probabilidad y equivalencia en la Técnica del Árbol de Fallas.....	141
Tabla C.1.	Daños físicos producidos por explosiones.....	145
Tabla C.2.a.	Daños producidos por explosiones dentro de Refinerías y plantas de proceso.....	146
Tabla C.2.b.	Daños producidos por explosiones dentro de Refinerías y plantas de proceso.....	147
Tabla C.3.	Efectos de Sobrepresión en personas.....	147
Tabla D.1.	Principales Hojas de Seguridad.....	155
Tabla D.2.	Significado de los valores empleados en el Diamante de la NFPA....	156
Tabla D.3.	Hojas de Seguridad para niveles de Toxicidad y Explosividad.....	158

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura II.1.	Utilidad de un Análisis de Riesgos.....	18
Figura II.2.	Etapas del Análisis de Riesgos.....	26
Figura II.3.	Diagrama de Flujo de la Técnica HAZOP.....	41
Figura II.4.	Ejemplo de una Matriz de Riesgos y las zonas según la clasificación de sus recomendaciones.....	45
Figura II.5.	Triángulo del Fuego.....	54
Figura III.1.	Árbol de productos básicos del petróleo crudo.....	63
Figura III.2.	Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).....	91
Figura D.1.	Diamante de Señalización de la NFPA.....	156

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica IV.1.	Concentración de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.....	130
Gráfica IV.2.	Tiempo desde el inicio de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.....	131
Gráfica IV.3.	Concentración de la emisión vs. Tiempo transcurrido desde la emisión.....	131
Gráfica IV.4.	Densidad de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.....	132
Gráfica IV.5.	Densidad de la emisión vs. Concentración de la emisión.....	132
Gráfica IV.6.	Sobrepresión de la explosión de la nube vs. Distancia al origen de la explosión.....	133

ÍNDICE DE PLANOS.

DIAGRAMA MECÁNICO DE FLUJO DE LA PLANTA DESPARAFINADORA	82
CC3-A CIRCUITO DE PROPANO.....	86
CC3-B CIRCUITO DE PROPANO.....	87
CC3-C CIRCUITO DE PROPANO.....	88
CC3-D CIRCUITO DE PROPANO.....	89
CC3-E CIRCUITO DE PROPANO.....	90
AFC1 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 1).....	111
AFC2 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 2).....	112
AFC3 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 3).....	113
AFC4 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 4).....	114
AFC5 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 5).....	115
AFCCM1 CONJUNTOS MÍNIMOS DEL ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 1).....	116
AFCCM2 CONJUNTOS MÍNIMOS DEL ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 2).....	117
AFCCM3 CONJUNTOS MÍNIMOS DEL ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR (HOJA 3).....	118
AFCCRECOM1 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR CON RECOMENDACIONES (HOJA 1).....	119
AFCCRECOM2 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR CON RECOMENDACIONES (HOJA 2).....	120
AFCCRECOM3 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR CON RECOMENDACIONES (HOJA 3).....	121
AC-1 DIAGRAMA DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS DEL INCENDIO DE UNA NUBE DE PROPANO-PROPILENO.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS GENERALES

AAF	Análisis de Árbol de Fallas
AC	Análisis de Consecuencias
ASME	American Society Mechanics Engineers <i>(Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)</i>
ASTM	American Society of Testing Msterials <i>(Sociedad Americana de Pruebas Mecánicas)</i>
API	American Petroleum Institute <i>(Instituto Americano del Petróleo)</i>
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion <i>(Explosión de líquido hirviendo por vapor en expansión)</i>
CAS	Chemical Abstracts Sistem <i>(Sistema de Resumen Químico)</i>
CERCLA	Comprehensive Environmental Recovery Compensation Liability Act <i>(Acta de Compensaciones y Responsabilidades Generales de Recuperación Ambiental)</i>
DFP	Diagrama de Flujo de Proceso
DMC	Diámetro Máximo Catastrófico
DMP	Diámetro Máximo Probable
DTI	Diagrama de Tubería e Instrumentación
EHS	Extremely Hazard Susbstance <i>(Sustancia Extremadamente Peligrosa)</i>
EPA	Environmental Protection Agency <i>(Agencia de Protección Ambiental)</i>
ERO	Estudio de Riesgos de Operabilidad
ETA	Events Tree Analysis <i>(Análisis de Árbol de Sucesos)</i>
FATV	Fracción Adiabática Teórica Vaporizada
F.M.	Factor de Material
FMEA	Failuree Mode and Effects Analysis <i>(Análisis de Modo de Fallas y Efectos)</i>
FTA	Fault Tree Analysis <i>(Análisis de Árbol de Fallas)</i>

HAZAN	Hazard and Operability Analysis (Análisis de Riesgos y Operabilidad)
HAZCHEM	Hazard Chemical Code
Code	(Código de Peligrosidad Química)
HAZOP	Hazard and Operability Studies (Estudios de Riesgos y Operabilidad)
IATA	International Air Transportation Agency (Agencia Internacional de Transportación Aérea)
ICAO	International Civic Aviation Organization (Organización Internacional de Aviación Civil)
I.D.	Índice Dow
IFE	Índice de Fuego y Explosividad
I.M.	Índice Mond
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code
Code	(Código Internacional Marítimo para Alta Peligrosidad)
LC50	Letal Concentration 50 (Concentración Letal para el 50% de una población de animales de experimentación)
LCL_o	Lowest Published Lethal Concentration (Concentración Letal Mínima Publicada)
LDLO	Lowest Published Lethal Doses (Dosis Letal Mínima Publicada)
LD50	Letal Doses 50 (Dosis Letal para el 50% de una población de animales para experimentación)
LEL	Lower Explosive Limit (Limite Inferior de Explosividad)
LIF	Límite Inferior de Inflamabilidad
LSF	Límite Superior de Inflamabilidad
MAK	Maximin Arbeitsplatz Konzentration (Concentración Máxima Permisible presente dentro del aire del centro de trabajo, exponiendo al trabajador 8 h diarias y 40 h a la semana)
NF	Índice de Inflamabilidad
NFPA	National Fire Protection Association (Asociación Nacional para la Protección contra el Fuego)

NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health (Instituto Nacional de Seguridad Ocupacional e Higiene)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional de Océanos y Atmósfera)
Nr	Índice de Reactividad
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act (Acta de Conservación de Recursos y Compensaciones)
RQ	Reportable Quantity (Cantidad de Sustancia que excede a la cantidad de la EPA)
RTECS	Registry of Toxic Effects of Chemicals (Registro de Efectos Tóxicos de Químicos)
STCC	Standard Transportation Commodity Code (Código de normas de Transportación de Mercancías)
TLV	Threshold Limit Values (Umbral de Valor Límite sin que se presenten efectos adversos en el personal expuesto)
TLV-CL	Threshold Limit Values - Ceiling Limit (Umbral de Valor Límite - Límite Cerrado. Concentración que no debe de ser excedida durante una jornada de trabajo)
TLV-STEL	Threshold Limit Values - Short Term Exposure Limit (Umbral de Valor Límite - LÍMITE de Exposición en períodos cortos de tiempo. Concentración que no debe de excederse en 15 minutos de una jornada de trabajo)
TLV-TWA	Threshold Limit Values - Time Weighted Concentration Age (Umbral de Valor Límite - Tiempo de exposición del trabajador 8 h diarias y 40 h a la semana sin que se presenten efectos adversos en el personal expuesto)
TNT	Trinitrotolueno
UN	United Nations (Organización de las Naciones Unidas, ONU)
UVCE	Unconfined Vapor Cloud Explosion (Explosión de Nubes de Vapor no Confinadas)
UEL	Upper Explosive Limit (Límite Superior de Inflamabilidad)

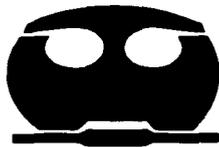
VME **Valeurs des Moyennes d' Exposition**
(Valores de Dosis de Exposición. Norma Francesa
Equivalente a TLV - TWA)

VLE **Valeurs Limites d' Exposition**
(Valores Limites de Exposición. Norma Francesa Equivalente
a TLV - STEL)

LISTA DE ABREVIATURAS DE INSTRUMENTACIÓN DE PROCESO

FRC	FLOW REGISTER CONTROL Control Registrador de Flujo
FRCV	FLOW REGISTER CONTROL VALVE Válvula de Control Registradora de Flujo
HLA	HIGH LEVEL ALARM Alarma de alto nivel
LCV	LEVEL CONTROL VALVE Válvula de Control de Nivel
LG	LEVEL GLASS Vidrio de Nivel
LLA	LOW LEVEL ALARM Alarma de bajo nivel
PRC	PRESSURE REGISTER CONTROL Control Registrador de Presión
PSV	PRESSURE SECURITY VALVE Válvula de Seguridad de Presión
TRC	TEMPERATURE REGISTER CONTROL Control Registrador de Temperatura
TPVC	TEMPERATURE REGISTER CONTROL VALVE Válvula de Control Registradora de Temperatura

**CAPÍTULO UNO:
INTRODUCCIÓN.**





*No somos ángeles caídos
sino antropoides erguidos.*

Ralph Linton

INTRODUCCIÓN.

La expresión anterior se refiere a la cualidad que tenemos como seres humanos para poder alcanzar objetivos que a primera vista parecerían excesivamente difíciles, todavía más, que para otros seres serían imposibles. Esto ha tornado que muchas veces que, debido a excesos de confianza y actitudes de soberbia, el ser humano se crea inmune a muchos elementos que al principio de su existencia por lo menos le infundieron respeto. Muchas veces, el ser humano se olvida de su condición física, de su frágil naturaleza, y sobre todo, de la responsabilidad que le ha sido impuesta por la Naturaleza al asignarle la capacidad mental más perfecta que jamás haya creado.

El Ser Humano no es el único ser social, existen muchos otros animales sociales. La unión con los demás debió haber nacido por una sensación de inseguridad, de debilidad, de deseos de ayuda mutua. Sin embargo, existen otros seres vivos que no necesitan de unirse para sentirse seguros, tan sólo con las armas que les fueron conferidas por la Naturaleza ya se sienten seguros. Se sienten seguros de su fuerza, de sus garras, de sus colmillos, de sus alas, de su veneno, de su agilidad, de sus inmensas mandíbulas, y en los casos de los más pequeños, se sienten seguros de su capacidad de reproducción, de su capacidad de adaptación. Los animales que viven al acecho de los demás, no tienen por que ser sociales. Los seres más débiles, en cambio, necesitan imperiosamente de la ayuda de sus demás congéneres. Si no encuentran esta ayuda, tarde o temprano acaban por perecer.

Uno de los más débiles seres que jamás hayan pisado la Tierra, el ser humano, no solo no ha desaparecido, sino que ha acabado por dominar a todos los demás animales e incluso, ha sido capaz de modificar su entorno para satisfacer sus necesidades básicas y hasta ha llegado a pensar en conocer otros mundos.

Contrariamente a lo que se podría creer, el ser humano es el ser más poderoso de la Tierra, pero no lo es intrínsecamente, es decir, por él mismo, ni por sus propias características físicas. No lo es por lo que está en él, sino por lo que está fuera de él. La naturaleza misma del entorno es lo que lo ha llevado a que sea un ser más reflexivo, más observador, más conciente de sí mismo, de su existencia y de su muerte. La misma naturaleza ha creado un mundo tal que, el ser humano no solo pueda someter a las



demás especies, sino que también es capaz de usar los recursos físicos que son materia prima de este mundo y transformarlos según le complazca.

Pareciera que la inteligencia del Ser Humano no tuviera límites. Sin embargo, como siempre sucede, no todo es perfecto. La naturaleza del Ser Humano lo hace cada vez más perfeccionista y con anhelos cada vez más extraordinarios. Esto lo conduce, a través de la historia, por etapas muy gloriosas para la raza humana, pero también lo lleva por senderos oscuros, de debilidad y de temor. Posiblemente estos últimos sean las mejores oportunidades para aprender. Y vaya si lo ha conseguido.

Dos de las ramas del conocimiento que más han avanzado desde la existencia del Ser Humano, es la Ingeniería, y en especial, la Química, ya que tienen la capacidad de modificar la forma y estructura de los recursos naturales y transformarlos en bienes que satisfacen necesidades.

Cuando estas dos ramas del conocimiento se fusionan, dan como resultado a la Ingeniería Química.

INGENIERÍA QUÍMICA

La Ingeniería Química nació aproximadamente en 1910, cuando los profesores del Massachusetts Institute of Technology se dieron cuenta de que en la industria, había aspectos, que ni la Ingeniería Mecánica ni la Química podían resolver por sí solas. La definición de Ingeniería Química es muy vaga y no existe un concepto universal para definirla. Lejos de ser esto un problema, se ha convertido en una de las grandes ventajas que tiene la Ingeniería Química sobre sus demás hermanas.

Un concepto de la Ingeniería Química es "... la aplicación de los principios de las ciencias físicas, junto con los principios de economía y relaciones humanas que atañen de forma directa a los procesos y equipos de proceso en los cuales se trata de modificar su estructura básica, ya sea cambiando su estado físico, contenido de energía o modificando su composición..." (Concepto utilizado en The Constitution of the American Institute of Chemical Engineers). El concepto anterior, aunque nos ofrece una visión muy grande, sólo refleja lo amplio del campo de acción de esta disciplina. Debido a lo multifacético de esta ingeniería, muy comúnmente se relaciona con otras profesiones, lo cual se traduce en rápidas modificaciones de métodos empleados. Otra peculiaridad de esta profesión es que puede hacernos ascender a lo sublime del conocimiento o



hacernos descender a los momentos más terribles de la raza humana, en los que muy regularmente esta relacionada la muerte.

Sin embargo, siguiendo el contexto que tiene esta Introducción y debido a los riesgos que encierra cualquier actividad que tenga que ver con sustancias químicas y la misma naturaleza humana que lo hace conciente de su vulnerabilidad física y de su propia muerte, se hace necesaria, en todo proceso químico, una metodología que pueda disminuir o, en el mejor de los casos, erradicar por completo los riesgos. Y es que el precio que se ha tenido que pagar por comprender esto ha sido muy alto. Sobre todo en la Ingeniería Química, donde accidentes como los ocurridos en San Juan Ixhuatepec, México (noviembre 19 de 1984); Bhopal, India (diciembre 2 de 1984), etc. dieron origen reclamos por parte de la sociedad para tener una mayor seguridad en las industrias.

Una de las áreas de la Química más atacadas por la sociedad ha sido la Petroquímica, la cual es considerada de alto riesgo y un gran peligro. Sin embargo, contrario a lo que se pudiera pensar, es una industria que más ha aportado en la actualidad al área de Seguridad Industrial. Y es que en la actualidad es impensable un mundo en el cual, su principal fuente de energía, el petróleo, sea desplazado, ya que todavía se carecen de otras fuentes más eficientes, más limpias y sobre todo más seguras.

Algunos grupos activistas han utilizado la ignorancia de las personas para causar protestas y cierres de plantas. Algunas quejas han sido justificadas, pero ha habido mucha agitación innecesaria debido a la información poco clara.

De allí que, en la Industria Química se le diera más trascendencia a una rama que se ocupa de reducir los riesgos que le son inherentes debido a la naturaleza de las materias primas que utiliza, por la misma naturaleza humana de los que laboran y dirigen en ella, etc.

Es la Seguridad Industrial la que se encarga de que los riesgos de cualquier industria sean asumibles, disminuyendo o suprimiendo las actividades que representen algún riesgo para las personas que allí laboran, las que viven cerca de estas industrias, el mismo Medio Ambiente y los bienes materiales de la misma.

El trabajo aquí presentado es sólo una muestra de los beneficios que tienen herramientas tan importantes como el Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP), el Análisis de Árbol de Fallas, el Análisis de Consecuencias y otras que se tratarán brevemente.

Muchas de las herramientas arriba mencionadas serán aplicadas al Circuito de Propano de una Planta Desparafinadora de Aceites Pesados, en la cual, se separa de las fracciones lubricantes del aceite refinado los hidrocarburos parafínicos. La separación de



CAPÍTULO UNO: INTRODUCCIÓN.



los aceites básicos o fracciones lubricantes de las parafinas se lleva a cabo por medio de un solvente selectivo que es una mezcla de Tolueno diluido en metil etil cetona. El proceso será explicado más detalladamente en el Capítulo III.

La importancia de esta planta es que en nuestro país sólo existe una y proporciona los aceites básicos para formular diversos tipos de lubricantes. Por lo tanto se hace necesario la operación adecuada de dicha planta, así como un estudio de este tipo que nos dé un panorama de las actividades de seguridad que se deben tener en ella.

La presente tesis trata de reducir los riesgos en la sección de compresión de la Planta Desparafinadora de Aceites Pesados, razón por la cual es necesario localizar posibles escenarios de riesgo.

En este capítulo se explica la importancia de la Ingeniería Química, por qué es necesario el Análisis de Riesgos y de forma general qué es un Análisis de Riesgos. También se establece un resumen y los objetivos de la presente tesis.

En el Capítulo Dos se enlistan las distintas técnicas que existen en la industria para llevar a cabo los análisis, la información necesaria para realizarlas, sus metodologías, así como la descripción de los pasos a seguir para llevarlas a cabo, además de las ventajas y limitaciones. Se presenta un glosario de palabras técnicas utilizadas en este trabajo. También se hace referencia a la terminología usada en los accidentes en los que se ve involucrado fuego así como diversos modelos matemáticos para determinar su comportamiento.

En el Capítulo Tres se explica el proceso de Desparafinación de Aceites Pesados junto con sus respectivos diagramas de tubería e instrumentación, explicándose también las principales operaciones unitarias que se llevan a cabo durante el proceso. Se mencionan las tres técnicas a emplear para llevar a cabo el Análisis de Riesgos (Análisis Hazop, Árbol de Fallas y Análisis de Consecuencias) y la selección del circuito a analizar. Se muestran los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos por el análisis Hazop, Análisis de Árbol de Fallos y Análisis de Consecuencias así como las gráficas construidas con los datos obtenidos.

Por último, en el Capítulo Cuatro se analizan los resultados obtenidos del análisis, así como las recomendaciones que son necesarias implementar en la planta para poder evitar o mitigar algún posible accidente que se pudiera presentar.



OBJETIVOS

- ❖ Proponer recomendaciones para disminuir la frecuencia del escenario y/o mitigar las consecuencias del evento en caso de que suceda.
- ❖ Establecer las acciones a realizar, por medio de un plan de trabajo, para mejorar la operabilidad de la Planta Desparafinadora de Aceites Pesados, y así, minimizar riesgos.
- ❖ Mediante la Técnica de Árbol de Fallas realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de un incidente hipotético previamente seleccionado ("Paro del Compresor de Propano").
- ❖ Proponer actividades y medidas preventivas para que no se realice dicho incidente.
- ❖ Realizar un Análisis de Consecuencias para la fuga de Propano de enfriamiento en una de las bridas del contenedor de Propano Líquido D-321, proponiendo un encuentro con la fuente de ignición.
- ❖ Realizar el Análisis de Consecuencias de la Explosión de la Nube no confinada de Propano fugado (UVCE).
- ❖ Realizar el Análisis de Consecuencias de la BLEVE que precedería después de la explosión de la Nube de Propano.



ETAPAS DEL PROYECTO

El proyecto de Análisis de Riesgos de la Planta Desparafinadora de Aceites Pesados fue realizado de Julio del año 2001 a Febrero del 2002, y tuvo las siguientes etapas:

I. Recopilación de Información y Actualización de DTI's

Es en esta etapa donde se recopilaron los manuales de la planta, y se actualizaron los diagramas de tubería e instrumentación, diagramas de servicios, planos generales de localización de equipos y diagramas de bloques de paro y arranque de la planta, los cuales son de gran importancia, ya que sin ellos no se puede llevar a cabo el estudio, pues proporcionan mucha información acerca del estado de la planta, las zonas de mayor riesgo, los equipos más peligrosos, las sustancias que se manejan, la instrumentación y servicios con los que se cuenta, etc.

II. Realización de Análisis de Riesgos y Operabilidad (Estudio Hazop)

Aquí se constituyó el equipo multidisciplinario que se encargaría de realizar el Análisis HAZOP, el cual quedó conformado por personal de diversos departamentos de la planta, así como por especialistas de la UNAM, que fueron quienes dirigieron el estudio. También fueron seleccionados los circuitos que fueron estudiados con dicha técnica, así como los nodos y la selección de las posibles desviaciones que serían analizadas.

III. Elaboración de la Lista de Recomendaciones

Con las hojas de datos que fueron generadas por el estudio, se elaboró una lista de recomendaciones de acuerdo a la probabilidad y gravedad del escenario hipotético. Dicha lista presenta acciones preventivas y correctivas para que el evento indeseable no llegue a ocurrir.

IV. Análisis de Resultados

Por último, se llevó a cabo el análisis de resultados del Árbol de Fallas del Compresor de Propano y del Análisis de consecuencias de la Fuga en el contenedor de Propano líquido D-321.

CAPÍTULO DOS:
PERSPECTIVA TEÓRICA.





*La necesidad es la madre del
arte de correr riesgos*

Anónimo

II.A. LOS RIESGOS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA

En la Industria, sobre todo en la Química, existe una gran preocupación por aplicar métodos sistematizados para eliminar o reducir los riesgos, tanto reales como potenciales, que puedan llegar a existir en las plantas de proceso. Existen un sin fin de motivos que pueden llegar a desencadenar un número igual de incidentes. En la **Tabla II.1.** se muestran los porcentajes correspondientes a las principales causas que dieron origen a diversos eventos que desencadenaron en incidentes:

CAUSA	% APROXIMADO
1) Ruptura de manguera	29
2) Sobrellenado de recipientes	14
3) Ruptura de brazo de carga	10
4) Golpes accidentales	8
5) Errores en el mantenimiento o mantenimiento menor al indicado	8
6) Congelación de válvula	6
7) Rupturas de tuberías de diámetros menores	6
8) Escape excesivo de sustancias en la manipulación de tuberías o accesorios	3
9) Otros	13

Tabla II. 1. Causas más frecuentes de accidentes en la Industria Química y sus porcentajes de recurrencias aproximados⁽¹⁾.

Como podemos apreciar, todas las causas anteriores tienen como raíz errores humanos que van desde la poca atención de los operarios, hasta la mala administración de recursos. Y esto no es nada nuevo, ya que por ejemplo, en México suceden accidentes de magnitudes mayores cada cuatro años aproximadamente, siendo que en otras partes del mundo, accidentes de las mismas características pero tratados con criterios diferentes, sólo sucederían cada millón de años.



Debido a las necesidades que existen, cada vez más sofisticadas, se requiere de materiales, sustancias y productos, que conllevan en su proceso un aumento en las presiones y temperaturas necesarias para producirlos, además, debido a las condiciones económicas que imperan en la actualidad, dichos procesos se procuran eficientes y económicos. Las condiciones de proceso anteriores obviamente ponen en riesgo la integridad de personas y del ambiente, por no mencionar a las instalaciones interiores y exteriores a la empresa. Los principales elementos que dan origen a estos riesgos son:

- Materias Primas
- Condiciones de Proceso
- Recursos Humanos
- Productos Terminados
- Condiciones Ambientales

Estos elementos de forma individual y de forma conjunta generan riesgos potenciales y riesgos reales que dependen de la forma en la que interactúen y de sus propias características.

Cuando hablamos de los riesgos de las Materias Primas, nos referimos a la naturaleza de ellas que pueden ser biológica, química, radiactiva, explosiva, tóxica, etc. Como es obvio, la característica de riesgo que tiene una materia prima impacta severamente en el riesgo que tendrá toda la industria, pues ellas se transforman en muchos casos, en elementos insustituibles de varios procesos, los cuales, no pueden continuar sin alguna materia prima en específico.

Cuando sucede que, alguna materia prima no se puede sustituir por otra, o que las reacciones o el proceso en sí es lento o poco eficiente, se buscan nuevas condiciones de trabajo, las cuales eleven los parámetros anteriores. Es aquí donde aparece el riesgo de proceso, el cual por sí solo, ya aparece en cualquier industria. Cuando se buscan condiciones que eficientizen al proceso, como pueden ser condiciones de temperatura, presión, concentración, etc. el riesgo del proceso se eleva, y en la mayoría de los casos no se puede predecir con exactitud que impacto se reflejará en la planta.

El riesgo en los Recursos Humanos se genera debido a la naturaleza humana que tienen todas las personas que laboran o están en contacto con la industria. Y es que, como lo vimos en la **Tabla II.1.**, la mayoría de los accidentes se pueden prevenir, pero, debido a que somos falibles, muchas veces se comete el error de subestimar algunas actividades que, aunque tienen pocas posibilidades de suceder, el riesgo es grande.



Otro de los riesgos que se presenta es el de los Productos Terminados, los cuales, en una industria como la química, tienen muchas posibilidades de conducir a un incidente. Este tipo de riesgo es muy similar, en características, al riesgo que se presenta con las materias primas, y depende de la naturaleza de la industria en la que se detecte.

El Riesgo de las Condiciones Ambientales es un riesgo que si bien muchas veces se puede prevenir, la mayoría de las veces es imposible de controlar. En este rubro se encuentran sucesos como tormentas, sequías, inundaciones, nevadas, terremotos, maremotos, etc. Este es un riesgo que, muchas veces se dejó de lado, sin embargo, ahora, ya no podemos darnos ese lujo, entre otras causas por que el clima se vuelve cada vez más impredecible.

Cada año suceden cientos de accidentes menores en todo el mundo, a menudo sin que sean conocidos por la opinión pública, pero al costo total directo del accidente, es necesario añadirle el costo debido a la suspensión de la producción, y por pérdidas de materias primas y/o productos terminados, además de los problemas legales y las indemnizaciones por causa de daños a personas o a la propiedad, así como a las primas de las compañías reaseguradoras.

Las empresas del rango químico por su parte han respondido, en general debido a las demandas de la sociedad, por lo que ha dado origen a la aparición de Programas de Gestión Medio-Ambiental y de Seguridad que se van extendiendo paulatinamente a la mayor parte de la industria química. Así se ha originado una creciente preocupación por aplicar métodos sistematizados para eliminar o reducir los riesgos, ya que, la sociedad en general exige una industria cada vez más limpia y menos peligrosa. Y no es para menos. Experiencias como la de Bophal, India, considerada como la catástrofe mayor a escala mundial, y los acontecimientos ocurridos en San Juan Ixhuatepec aquí en México, ha originado mayor conciencia acerca de esta industria y de lo que se realiza dentro de ella.

En la **Tabla II.2.** se presentan los accidentes catastróficos más importantes en el ámbito mundial ocurridos en la Industria Química, Petroquímica y Nuclear.

Con las mejoras que se han hecho a nivel tecnológico, a las plantas químicas, se les han incrementado los niveles de producción, elevando el número de personas que laboran y que están expuestas a los riesgos que implica el proceso.



CAPÍTULO DOS: PERSPECTIVA TEÓRICA.



ACCIDENTES Y CAUSAS QUE LOS ORIGINARON	CONSECUENCIAS
<p><u>Cubatão (Brasil), 25 de Febrero de 1974.</u> Un oleoducto sufre daños. La gasolina que escapa, se evapora e inflama, dando origen a una gran bola de fuego.</p>	<p>Al menos 500 muertos.</p>
<p><u>Flixborough (UK), 1 de Junio de 1974.</u> En una planta de Nypro la ruptura de una tubería provoca la descarga de unas 80 toneladas de Ciclohexano líquido y caliente. La nube resultante da origen a una explosión de gran poder destructivo.</p>	<p>28 muertos y cientos de heridos. Destrucción completa de las instalaciones.</p>
<p><u>Seveso (Italia), 9 de Julio de 1976.</u> En una planta de Icmesa (Hoffmann La Roche), una reacción química provoca venteo de un reactor liberándose aproximadamente 2 toneladas de productos químicos a la atmósfera. Entre estos existía de 0.5 a 2 Kg de dioxina (TCDD), cuya dosis letal para una persona de sensibilidad promedio es inferior a 0.1 mg.</p>	<p>Fue preciso evacuar a más de 1000 personas. No hubo muertos como consecuencia directa del accidente, pero la dioxina afectó a muchas personas (acné por cloro), se produjeron abortos espontáneos y contaminación de suelo.</p>
<p><u>Campina de los Ataques, San Carlos de la Rapita (España), 11 de Julio de 1978.</u> Un camión con unos 45 m³ de propileno, dio origen a una explosión BLEVE al chocar con la pared de un campamento.</p>	<p>215 muertos.</p>
<p><u>Isla de las Tres Millas, Pensilvania, USA., Marzo de 1979.</u> Falla el sistema de enfriamiento de una planta nuclear en un entrenamiento que se realizaba con el sistema de emergencias de enfriamiento fuera de servicio.</p>	<p>Las pérdidas económicas ascendieron a los 1.3 mil millones de dólares, los daños físicos a la planta fueron mayores y se emitió una nube radiactiva a la atmósfera sin consecuencias fatales.</p>
<p><u>San Juan Ixhuatepec, Tlanepanilla, Edo. de México, muy cerca de la Ciudad de México, 19 de Noviembre de 1984.</u> Hacen explosión varios tanques de almacenamiento de gas L.P.</p>	<p>452 muertos y más de 4,200 heridos. El número de desaparecidos puede ser de 1,000 personas.</p>
<p><u>Bhopal (India), 2 de Diciembre de 1984.</u> Se produce un escape de gas venenoso (Isocianato de Metilo) en una planta de Unión Carbide que producía insecticidas. La emisión se esparce sobre una superficie de unos 40 Km².</p>	<p>2,500 muertos por envenenamiento y aproximadamente el mismo número en condiciones críticas. Unas 150,000 personas requirieron tratamiento médico. Se produjeron efectos a largo plazo, como ceguera, trastornos mentales, lesiones hepáticas y renales, así como malformaciones embrionarias.</p>
<p><u>Planta Nuclear de Chernobyl, Rusia, Ex URSS, 26 de Abril de 1986.</u> Oscilaciones en la corriente de energía eléctrica y un descontrol en la reacción nuclear debido a pruebas de modificación en el reactor.</p>	<p>30 muertos de forma directa y por lo menos 500 heridos debido a la exposición a la radiación. Seis mil millones de dólares perdidos en el año de 1986. Imposible predecir el número de muertes por cáncer que producirá la nube radiactiva que se extendió por toda Europa y parte de Norte América.</p>
<p><u>Passadena, Cal, USA, Octubre de 1989.</u> En una planta petroquímica se derrama accidentalmente una mezcla de Etileno-Isobutano. Se presenta el mayor derrame continental de hidrocarburos de la historia.</p>	<p>23 muertos, 132 heridos, pérdidas económicas mayores a los 700 millones de dólares.</p>
<p><u>Guadalajara (México), 23 de Abril de 1992.</u> Se produce una serie de explosiones en cadena a lo largo de la red urbana de alcantarillado de unos 13 Km de longitud, al parecer debido a la acumulación de combustible por fuga.</p>	<p>Los datos oficiales informan de 200 muertos y 1,500 heridos, 1,200 viviendas destruidas, así como 450 inmuebles comerciales. Las estimaciones de daños económicos están alrededor de los 7,000 millones de dólares.</p>
<p><u>Complejo Productor de Gas, Cactus, Chiapas (México), 26 de Julio de 1996.</u> Explosión en las dos unidades criogénicas. La causa del accidente fue una fuga de gas en una bomba.</p>	<p>Total destrucción de las dos plantas criogénicas, un radio de devastación de hasta 500 m. Por lo menos 14 personas perdieron la vida. Se dejó de producir por lo menos 14 millones de pies cúbicos diariamente. Pérdidas económicas cuantiosas.</p>

TESIS CON
 PALLA DE...

Tabla II. 2. Accidentes industriales mayores a nivel mundial a partir de 1974⁽¹⁾.

Es por eso que se origina la necesidad de estudios que prevean acciones o elementos que generen accidentes, y en consecuencia tomar medidas que sean preventivas y a



veces correctivas. Muchas empresas han tomado cuenta de esto, y es por eso que han incluido en sus prioridades hacer análisis de riesgos para asegurar la integridad de las personas, tanto de las que laboran en la empresa como de las que están ubicadas cerca de la empresa, asegurar la calidad del medio ambiente y las instalaciones de la empresa.

Las herramientas que se han ideado para tratar dichos riesgos constituyen la evaluación y administración de riesgos. En esta parte de la ingeniería la jerarquización de elementos es muy importante ya que, de no hacerse de forma adecuada y con pleno conocimiento de las sustancias y etapas que tiene el proceso, se pueden generar errores por los que haya que pagar costos muy altos.

II.B. ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LOS ACCIDENTES

El peligro es definido como el evento en el cual un riesgo se transforma a la realidad. La relación que existe entre la magnitud del peligro y las consecuencias del accidente son proporcionales, algo muy lógico y fácil de visualizar en la Industria de la Química. Y es aquí, donde se hace necesaria una secuencia cuidadosa de las causas y hechos que puede terminar en un accidente, lo que nos da una oportunidad de actuar previamente y así, evitar las acciones o las actitudes que lo desenlacen.

El evento iniciante, el que es la causa inmediata y directa del accidente, es, en la secuencia de eventos, el primer evento de dicha secuencia y por lo general, va desde las fallas humanas hasta situaciones incontrolables, como el estado del tiempo.

En algunos casos, este evento, el iniciante, puede ser el único que se detecte en la secuencia de eventos, y esto sucede cuando no hay protecciones o actividades preventivas y correctivas para evitarlo, o cuando las consecuencias de su existencia son tan severas que, sobrepasan todas las protecciones existentes. Sin embargo, lo anterior es muy extraño, pues además de existir una serie de eventos iniciantes, existe una serie de eventos que relaciona a los iniciantes con el resultado, es decir, con el accidente.

En esta secuencia que relaciona evento iniciante y accidente, los eventos intermedios de la relación se pueden clasificar en factores propagantes y factores de reducción de riesgos.

En la **Tabla II.3.** se muestran los principales resultados de eventos intermedios (propagantes y que reducen el riesgo).

Los primeros, como lo indica su nombre, son aquellos que por sus características y las condiciones, de llevarse a cabo, aceleran o generan otros factores que a su vez



aceleren a los eventos en dirección del accidente. Algunos ejemplos de estos factores son las fallas en los sistemas de seguridad implementados, condiciones meteorológicas adversas, condiciones de ignorancia sobre el estudio de algunas características específicas para las sustancias, etc.

Resultado:	Factores Propagantes:	Factores reductores de riesgo:
<ul style="list-style-type: none">➤ Fenómenos:<ul style="list-style-type: none">• Dispersión• Descarga• Destello y evaporación<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Gas natural y boyante• Incendios:<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Dardos de fuego<input type="checkbox"/> Alberca o charco encendidos<input type="checkbox"/> Incendio repentino• Explosiones:<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> BLEVE's<input type="checkbox"/> Bola de fuego<input type="checkbox"/> Explosiones de nubes en confinamiento<input type="checkbox"/> Explosiones de vapores sin confinar<input type="checkbox"/> Polvos explosivos<input type="checkbox"/> Detonaciones• Projectiles➤ Consecuencias:<ul style="list-style-type: none">• Análisis de efectos<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Efectos por sobre presión<input type="checkbox"/> Efectos Térmicos<input type="checkbox"/> Efectos tóxicos• Evaluación de daños<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Comunidad<input type="checkbox"/> Fuerza de trabajo<input type="checkbox"/> Medio Ambiente<input type="checkbox"/> Bienes de la compañía<input type="checkbox"/> Producción	<ul style="list-style-type: none">➤ Fallas en los equipos:<ul style="list-style-type: none">• Fallas en los sistemas de seguridad➤ Fuentes de Ignición:<ul style="list-style-type: none">• Hornos• Incineradores• Vehículos en marcha• Interruptores eléctricos• Electricidad estática• Superficies a alta temperatura• Chispas de cigarrillos o encendedores➤ Fallas en el Sistema de Administración:➤ Errores Humanos:<ul style="list-style-type: none">• Omisión• Obra• Fallas de diagnóstico• Fallas en las tomas de decisiones➤ Fallas del tipo "Efecto dominó":<ul style="list-style-type: none">• Otras fallas de recipientes• Otras fugas de materiales➤ Condiciones Externas a la planta:<ul style="list-style-type: none">• Visibilidad• Meteorológicas• Sísmicas	<ul style="list-style-type: none">➤ Respuesta del control/ operador:<ul style="list-style-type: none">• Sistemas de Detección de gas y fuego• Respuesta automática del sistema de control• Alarmas visibles y audibles➤ Respuesta del sistema de Seguridad:<ul style="list-style-type: none">• Sistemas de respaldo• Sistemas de aislamiento• Sistemas de despresurización• Válvulas de alivio➤ Respuesta del sistema de mitigación:<ul style="list-style-type: none">• Evacuación• Refugios• Equipos de protección personal• Procedimientos de emergencias• Sistemas de alarmas• Sistemas de aspersores• Sistemas de mitigación por niebla➤ Condiciones Externas:<ul style="list-style-type: none">• Estructuras con diseños especiales• Detección y advertencia temprana de los riesgos➤ Capacitación del personal➤ Otros sistemas de Administración.

Tabla II.3. Resultados de Eventos Intermedios (propagantes y de reducción de riesgo)⁽¹⁶⁾.



En el segundo grupo se encuentran aquellos factores que se consideran como una respuesta adecuada de los sistemas de seguridad y/o administrativos, los cuales han sido implementados para reducir la frecuencia o la gravedad de los daños causados por el accidente. Incluso, algunas veces, incidentes fortuitos participan en este tipo de factores, los cuales casi siempre no se toman en cuenta por escapar a nuestro control, o por las bajas posibilidades que tienen de suceder.

En la **Tabla II.4.** se puede observar los elementos que han sido detectados al generarse los accidentes de proceso.

Hay que señalar que, de contar con una secuencia de eventos, que tenga el mayor número de causas lógicas posibles y que presente gran cantidad de información, es muy posible interrumpir la ruta hacia el accidente en cualquiera de los eventos propagantes, o por lo menos disminuir las consecuencias de éste.

Condiciones Físicas Extremas por:	Grandes almacenamientos de:
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Altas Temperaturas ❖ Temperaturas muy bajas ❖ Ciclos de Temperatura ❖ Altas Presiones ❖ Muy bajas presiones o vacío ❖ Ciclos de Presión ❖ Vibración o "martilleo" líquido ❖ Radiaciones ionizantes ❖ Altos voltajes ❖ Altas intensidades de corriente ❖ Corrosión ❖ Erosión 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Polvos combustibles ❖ Gases inertes ❖ Materiales tóxicos ❖ Materiales altamente reactivos o inestables ❖ Materiales sensibles a los impactos ❖ Polvos y gases asfixiantes ❖ Materiales corrosivos ❖ Materiales combustibles ❖ Materiales inflamables ❖ Materiales de alta emisión ionizante ❖ Materiales biológicos tóxicos o virulentos

Tabla II. 4. Factores de riesgo para los accidentes de proceso⁽¹⁶⁾.

TESIS CON FALLA DE PROCESO

II.C. TRABAJO Y PREPARACIÓN PREVIOS AL ANÁLISIS DE RIESGOS: COMPROMISOS

Al realizar un análisis se deben previamente considerar varios aspectos, los cuales pueden malograr al análisis, o mermar sus alcances. Es por ello que las personas que soliciten el análisis, así como las personas que lo vayan a realizar, tengan en mente los objetivos de la empresa y así conjuntar esfuerzos para obtener los mejores resultados.

Aquí, las políticas de seguridad de la empresa jugarán un papel muy importante, ya que tendrán como objetivo proveer de recursos al grupo que está participando en el análisis, para poder llevar a cabo el análisis sin inhibiciones administrativas. Lo anterior, es necesario que lo entiendan los directivos y altos mandos de la empresa, ya que, este aspecto muchas veces llega a no tomarse en cuenta en el trabajo previo al análisis.



Para los fines que se buscan en esta tesis se ha conformado un glosario de términos utilizados en las Técnicas de Análisis de Riesgos (**Ver Apéndice A**).

A continuación se presenta una lista de los aspectos en los que se deben de comprometer empresa y equipo de análisis para iniciarlo:

- A) Contar con los conocimientos del proceso actualizados y al alcance del equipo de seguridad de la planta.** Este aspecto es muy importante, ya que el análisis se hará sobre la información proporcionada por la empresa, y si no está debidamente organizada y actualizada, el análisis será erróneo o poco fiel a la actualidad de la planta. De ser posible, se recomienda a las empresas elaborar un programa de control de cambios, el cual asegure que sean registrados oportunamente, en planos y procedimientos, todos aquellos cambios físicos realizados en el proceso, ya sea por reconfiguración, reciclaje de elementos, equipos o accesorios, o para mejorar las condiciones del mismo. También es recomendable que para iniciar el análisis, de no contar con información confiable o reciente del proceso, se haga una verificación o actualización en campo, según sea necesario.
- B) Designar al grupo multidisciplinario para el análisis.** Para ello es recomendable que se incluyan personas de la misma planta, contratistas, vendedores, consultores independientes, etc. Y hay que resaltar que la misma gente de la planta apoyan en mucho, ofreciendo sus experiencias en el proceso mismo que es estudiado y dando puntos de vista que de otra forma, serían muy difíciles de visualizar en la bibliografía. Es recomendable que este grupo no tenga, mientras dura el análisis, ninguna distracción o interrupción que le hagan perder continuidad y fluidez a las sesiones. Es aquí, donde el apoyo y compromiso de los directivos de la empresa se hace necesario, pues se requerirá de toda la concentración posible del grupo.
- C) Acatar de manera rápida y precisa las medidas y recomendaciones que hayan sido generadas por el análisis.** La administración deberá de crear un organismo o sistema que se encargue de que la respuesta a estos resultados sea garantizada. Herramientas como supervisiones y



auditorías que regulen y vigilen las asignaciones de recursos a los proyectos de disminución de riesgos, pueden ser utilizadas para estos fines.

D) Elaboración y fomento de análisis posteriores en otras áreas de la planta.

Este compromiso lleva como fin el que, distintas áreas de la empresa, se vinculen de forma tal que, la reducción de riesgos aumente al máximo. Además, posiblemente muchos aspectos que no fueron tomados en cuenta dentro del área de estudio de análisis, se tomen en cuenta dentro de estudios posteriores, lo que se traduce en un estudio total que, a su vez, abarque mayor número de aspectos de la empresa. Otro beneficio de procurar análisis posteriores es que, el personal va tomando más experiencia en ellos, lo que se traduce en análisis cada vez más completos.

El último punto es de gran importancia, ya que todo aquel aspecto peligroso que no haya sido identificado, no será tomado en cuenta en el estudio, lo cual se reflejará en una muy posible disminución de las medidas de seguridad que el análisis propondrá, dando como resultado, no solo el peligro inherente al aspecto en cuestión, sino que el riesgo de desconocerlo lo hace potencialmente aún más peligroso. Para prevenir esto, se usan herramientas como el análisis de propiedades físico químicas de las sustancias, condiciones y experiencias peligrosas en la manipulación de las mismas, a nivel organizacional e industrial, matrices de interacción entre dos o más sustancias, etc.

Obviamente, no solo las sustancias crean situaciones de peligro, también las condiciones a las que son sometidas durante el proceso generan estas situaciones. Es por eso que también se deben de tomar en cuenta condiciones anormales del proceso, las cuales pueden generar peligro, por sí solas o en conjunto con sustancias químicas u otras condiciones, normales o anormales.

Algunos elementos con los que se pueden evaluar estas situaciones son, los manuales de procedimientos con los que cuentan las compañías, los manuales técnicos, los códigos y estándares de ingeniería que sean aplicados al proceso, etc., los cuales deben de estar siempre al alcance de las personas de la compañía que se interesen en usarlos.



II.D. ANÁLISIS DE RIESGOS

El Análisis de Riesgos se define como la metodología para estimar la magnitud y la ocurrencia o probabilidad de un evento y la magnitud de los efectos que conllevaría en caso de que se llegara a culminar en un cierto lapso de tiempo.

En la Evaluación y Administración de Riesgos, cuando se hace el estudio de un evento se realizan preguntas del tipo: ¿Qué puede fallar y por qué?, ¿Cuál es la probabilidad de que esto suceda?, ¿Cuáles serían los alcances negativos del (de los) evento(s) en caso de que se llegara(n) a culminar?, ¿Se puede eliminar o reducir el riesgo?, ¿Cómo podemos reducirlo o eliminarlo?. Por lo tanto, de aquí se desprende que los riesgos sean función de la población afectada (directa e indirectamente), la probabilidad de la ocurrencia y de la magnitud de las consecuencias (ambientales, sociales, económicas, etc.)

Además, el Análisis de Riesgos es de mucha utilidad porque nos permite identificar las causas de un accidente y los mecanismos de su desarrollo, así como también, nos permite evaluar las consecuencias. Además, el análisis justifica las decisiones que se toman para la implementación de medidas correctivas que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de un accidente o cuando menos, se mitigan sus consecuencias. En la **Figura II.1** se muestra la utilidad de un análisis de riesgos.

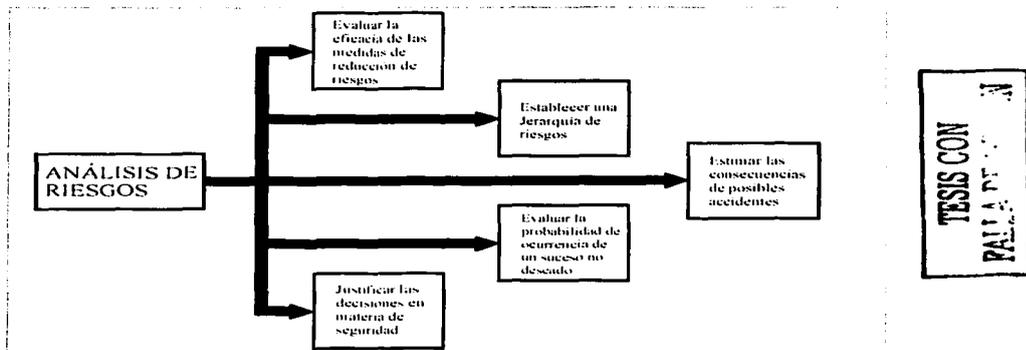


Figura II.1. Utilidad de un Análisis de Riesgos⁽²⁰⁾.

La diferencia entre cada planta y las diferencias de las personas, hacen que exista un gran número de riesgos. Estos son clasificados de acuerdo a las características que



tienen (efectos inmediatos, efectos en el Medio Ambiente, efectos económicos, efectos en las instalaciones, en la salud de los operarios, en la población, etc.)

Las diferentes categorías para la evaluación de riesgos y sus respectivas características se representan en la **Tabla II.5.**

Ambiental	Efectos muy sutiles con miles de interacciones entre comunidades, poblaciones y ecosistemas a niveles micro y macro, que por la naturaleza de dichas interacciones, no se puede prever posibles efectos en cierto tiempo o a ciertas distancias de las fuentes que los generaron.
Bienestar Social	Conciernen a la opinión pública acerca del desempeño de la empresa y de sus productos. Se impacta directamente en el valor de las propiedades, así como en el uso de recursos que se hace cada vez más limitado. Se emplea a corto, mediano y largo plazo.
Financieros	Son aquellos que conciernen a los riesgos de propiedades, utilidades y producción. Se estudian a corto y largo plazo. Se emplean la viabilidad y operación financiera.
Salud	Se utilizan normas de estandarización para exposición a ciertas sustancias. Las relaciones causa-efecto son difíciles de establecer. Se estudia sobre todo a largo plazo.
Seguridad Industrial	Son los accidentes de graves consecuencias y efectos inmediatos graves. Aquí, el tiempo de respuesta de las medidas preventivas o correctivas son críticos y las relaciones causa-efecto son evidentes. Su estudio es a corto, mediano y largo plazo.

Tabla II.5. Clasificación de Riesgos y sus características⁽²¹⁾.

Un riesgo puede ser aceptado con su nivel de riesgo que tiene, o reducirlo si no puede ser eliminado. La decisión implica estimar la magnitud de las consecuencias que pueden derivarse de un accidente y de la probabilidad del mismo, así como el costo de las medidas correctivas.

II.D.1. METAS, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

Cuando se realiza un Análisis de riesgos, se busca alcanzar:



CAPÍTULO DOS: PERSPECTIVA TEÓRICA.



- 1) Un mayor entendimiento del riesgo. Esto se alcanza aumentando y mejorando el conocimiento de éste en la relación de espacio tiempo y como afectan a la posible fuente que lo genera.
- 2) Optimizar el uso de recursos de forma sistematizada, identificando los riesgos que sean más críticos por los alcances que conllevan.

Entre algunas de las ventajas que tienen los Análisis de Riesgos se encuentran:

- ✓ Al jerarquizar los posibles riesgos de un proceso se puede tener una perspectiva más amplia de los problemas que, a mediano y largo plazo, se puedan presentar, y de esta forma se pueden canalizar recursos para prevenirlos, eliminarlos, remediarlos o controlarlos de ser necesario.
- ✓ Estas evaluaciones pueden realizarse desde las primeras etapas del proyecto (diseño y construcción) de una forma eficiente.
- ✓ Una vez en marcha la operación del proceso, se puede realizar de forma periódica, durante la operación, el paro (temporal o definitivo) y la desmantelación.
- ✓ Al complementarse con otras herramientas y programas de seguridad, se pueden visualizar e inspeccionar posibles deficiencias del proceso, antes de que sea construido u operado.

Y sus posibles deficiencias serían:

- × Por ser una herramienta de implementación relativamente nueva en la Seguridad Industrial, no existe un número suficiente de expertos en el tema.
- × Por la misma escasez de profesionales de esta área, muchas veces se cuenta con conocimientos insuficientes del tema, lo cual se refleja en el momento en el que se establecen los objetivos del estudio, la recopilación de información, las suposiciones especulativas, etc.
- × El analista nunca puede asegurar que han sido identificadas todas las situaciones de peligro, así como tampoco puede asegurar que para



aquellas situaciones de peligro que fueron objeto del estudio hallan sido identificadas todas las posibles causas o situaciones potenciales que les dieron origen.

- * Es un método no reproducible debido a la naturaleza subjetiva de la técnica y las diferentes experiencias de los analistas.

Las desventajas que acaban de ser enumeradas, no pueden ser motivo para que esta técnica sea despreciada o rechazada. Su beneficio más grande es que, se puede aprender de ella, incluso, sin necesidad de que exista físicamente la planta de proceso. Definitivamente, puede diferir la condición real de la planta, pero aprender empíricamente ya es un lujo que no podemos darnos, y aún más, cuando las consecuencias del accidente son de gran magnitud.

II.D.2. INTERPRETACIÓN DEL RIESGO

La interpretación del riesgo es una parte muy importante del análisis, ya que, como se mencionó con anterioridad, esta interpretación depende de la perspectiva del analista y del grupo que colabora con él. Se sugiere que los riesgos sean agrupados en dos: A) los peores y mayores riesgos, basados en rangos donde se aseguren la integridad del ser humano y del ambiente y B) riesgos que ofrecen las mejores y mayores oportunidades de reducción (aquellos que cuentan con las mejores relaciones costo beneficio). Los riesgos que encierran consecuencias más críticas de ambas listas serán los que deban recibir mayor prioridad en la asignación de recursos. Y es que, la imprecisión de prioridades puede conducirnos a una mala estimación para la asignación de recursos. Esta etapa también es conocida como Administración de Riesgos en la cual se toman las decisiones para trabajar sobre los riesgos de mayor prioridad, y realización de estrategias, basándose en los datos que fueron arrojados por el análisis.

En la Administración de Riesgos, se deben clasificar a los riesgos no sólo cuantitativamente, es decir, por los rangos de peligrosidad que fueron adoptados previamente, sino también cualitativamente. De acuerdo a esto, se forman tres categorías de riesgo: Alto, mediano y bajo.

Muchas veces los riesgos que se estudian en esta clasificación son comparados con otros que ya hayan sido regulados o tratados previamente. De ser más peligroso que el riesgo que se usa para comparar, se buscan opciones para reducirlo, si es similar, se



toman las mismas medidas que fueron tomadas en el que ya fue tratado, y de ser menor puede que sea tolerado, esto dependerá, otra vez, del criterio del administrador del riesgo. Haciendo énfasis en los criterios utilizados para la evaluación y la administración de riesgos, cabría señalar que es de mucha ayuda el que sea tomado en cuenta la percepción de la sociedad acerca de riesgos que muchas veces son considerados como aceptables en la aplicación de análisis. Y es que, al realizarse un análisis de este tipo, lo que se busca, además de la seguridad de las personas, el ambiente y los bienes de la empresa, es tener plena conciencia de que el riesgo que se corre vale la pena, y de ser así, tomarlo, conciente de lo que está en juego.

Por eso, el actual modelo de Administración de Riesgos cuenta con una política que va de la mano con la ciencia, además de que, considera los valores de la sociedad, lo cual conlleva una parte subjetiva de esta, pero que a su vez, le da un enfoque más humano al análisis.

II.D.3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE RIESGO

Al interpretar los riesgos, se hace necesario una metodología en la cual, se presenten por etapas los conceptos básicos que hay que tomar en cuenta:

A. Definir las metas de la empresa (incluyendo la Seguridad Humana y la Industrial).

Estas metas, generalmente se establecen de acuerdo a los objetivos de cada empresa, sus metas profesionales y los criterios de aceptabilidad de riesgos, los cuales en su mayoría son legislados. Es de gran ayuda, para los casos de empresas muy grandes que, se hagan estudios por separado, y por fracciones (mejor conocidas como circuitos) bien identificadas de ésta, ya que el análisis, además de hacerse menos difícil, no aumentan las opciones potenciales al interrelacionarse entre sí. También es ideal que sea realizado por las personas que tengan el poder de decisión sobre los ámbitos de la empresa que se ven involucrados en el análisis.

B. Evaluar los riesgos y visualizar los recursos que se encuentran en juego.

Aquí podemos visualizar dos objetivos de la empresa: las prioridades dentro del límite de batería (salud de operadores, seguridad de las instalaciones y del equipo), y las



prioridades externas (salud y seguridad pública, recursos naturales y económicos externos, etc.). Además, se deben de tomar en cuenta opciones subjetivas a la empresa, ya que existen situaciones en las cuales no puede haber una cuantificación, y sin embargo, son de gran impacto para la empresa (por ejemplo la buena voluntad de la sociedad, la cual se ve muy relacionada con la opinión pública hacia la empresa).

C. Buscar alternativas y desarrollar las estrategias para mitigar y si es posible, eliminar los riesgos.

Esta etapa debe de ser realizada por un grupo de personas de distintas áreas de la planta: ingenieros, laboratoristas, técnicos, analistas y administradores de riesgos. No es recomendable, en esta etapa, que este presente una persona del área económica, la cual será incluida hasta la etapa número cuatro, ya que se desea evitar que el aspecto económico interfiera en el proceso inicial de la búsqueda de alternativas. Esta etapa nos arrojará una serie de recomendaciones, las cuales, dependiendo de la relación costo beneficio, deberán ponerse en marcha, en cuanto los recursos humanos y económicos lo permitan. La relación costo beneficio es desarrollada en la siguiente etapa.

D. Colocar, de acuerdo a las prioridades antes establecidas, las oportunidades de mitigación o de eliminación de riesgos.

En esta etapa de jerarquización, es de vital importancia la relación costo beneficio, la cual es estimada y valorada, involucrando costos aproximados. Aquí existe la posibilidad de que se presente una persona del área económica, la cual será de gran ayuda pues, se podrán hacer consideraciones y optimizaciones que hagan posible la implementación de las recomendaciones generadas por el análisis.

E. Implementación de recomendaciones o medidas preventivas y correctivas. Seguimiento de dichas medidas.

Es recomendable que las medidas que tengan prioridad en ser implementadas sean aquellas que cuenten con la relación costo beneficio más baja, pues muchas veces, la implementación de dichas recomendaciones favorecerán la implementación de las subsecuentes, y en algunos casos, mitigarán los riesgos restantes.



II.D.4. ASUMIR EL RIESGO

Debido a la naturaleza de la industria, basándose siempre en un gran número de criterios, el analista de riesgos debe elegir si un riesgo es asumible o no. A esto se le conoce como razón riesgo-beneficio. En esta etapa se selecciona si el riesgo está en un nivel seguro o aceptable. Y aunque existen los principios de cero riesgos y el de mínimo de riesgos (de latín *minimus*: muy pequeño), ambos son muy difíciles de cumplir.

El principio de cero riesgos nos dice que ningún riesgo puede ser tolerado por mínimo que éste sea. Tampoco se toma en cuenta el posible beneficio que pueda aportar a la ciencia o la sociedad. Obviamente, éste principio es muy utópico y difícil de llevar a cabo. Aquí, la relación entre el costo y el beneficio no existe.

Por otra parte, en el principio del mínimo de riesgos, existen pequeños riesgos que aparentemente no deben de ser tomados en cuenta, ya que por su frecuencia, sus consecuencias, sus raíces, etc., no son factibles de que se lleguen a realizar. Este concepto llega a ser muy ambiguo debido a que, los niveles mínimos aceptables de un riesgo a veces varían mucho entre sociedades e industrias.

Existe un tercer principio, el principio de riesgos de *manifestis* (latín: manifestar, expresar, aquello que es obvio). Según este principio, todo aquel riesgo que se encuentre en esta categoría deberá de ser controlado y sin importar los recursos que halla que invertir en ello.

De los principios de riesgos que se presentan aquí, el más utilizado es este último, ya que puede, con algunas modificaciones, acercarse más a la realidad que cualquiera de los otros dos.

II.D.5. ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

El sistema de Análisis de Riesgos tiene etapas que cuentan con la ventaja de ser adaptadas según las necesidades que aparezcan.

Todo inicia con la pregunta: ¿qué puede salir mal?, la cual nos da una visión de todas aquellas actividades o acontecimientos que puedan generar (de llevarse a cabo) efectos no deseables en las personas, el ambiente o las instalaciones. La pregunta, aunque es de carácter cualitativo, da origen a la identificación de los riesgos. Esta etapa debe de ser exhaustiva y precisa, ya que no se puede dejar de lado ningún evento que sea significativo y con posibilidades razonables de suceder. Para esto, la experiencia de las personas que intervengan en el análisis es de gran valía.



Después de lo anterior, el siguiente paso es contestar las preguntas: "de suceder esto, ¿qué consecuencias tendrá?, ¿qué alcances se manifestarán?". Aquí es necesario contar con modelos que puedan estimar los efectos que se originen por las causas detectadas. Para seleccionar el modelo se tiene que tomar en cuenta las consecuencias de cada evento y usar el más adecuado.

La tercera pregunta que se debe de realizar: "¿qué posibilidades tiene de suceder?, ¿con qué frecuencia sucede, o ha sucedido, este evento?". Esta etapa es más cuantitativa que las dos anteriores, y lo que se busca es estimar la probabilidad del evento. Esta etapa es de gran importancia, ya que, los resultados de ella son las pérdidas estadísticas, las cuales impactarán directamente en la toma de decisiones posterior.

Herramientas como los estándares de diseño, códigos de buenas prácticas, listas de verificación, índices de riesgos, registros históricos de accidentes, análisis del tipo: "¿qué pasa sí?", análisis de riesgos y de operabilidad (en Inglés HAZOP), etc. son aplicadas para este análisis.

Otras herramientas que también pueden ser utilizadas en esta etapa, y que son de gran utilidad por la visión que nos arrojan, y debido a las dificultades que se presentan en la recolección de datos de accidentes, son los Árboles de Fallas y el Análisis del Árbol de Eventos, los cuales proporcionan probabilidades a la secuencia de eventos considerada. Cabe mencionar que en esta etapa es donde más incertidumbre existe, por lo cual debe de tenerse mucho cuidado de no hacer suposiciones poco razonables o de utilizar modelos incorrectos.

A grandes rasgos, podemos asumir que las etapas para realizar un análisis de riesgos se concentran en los siguientes puntos:

- 1) Definir los alcances del estudio.
- 2) Identificar y evaluar los riesgos.
- 3) Cuantificar y analizar los riesgos.
- 4) Evaluación de la Aceptabilidad del riesgo.
- 5) Tomar medidas necesarias.
- 6) Recalcular los riesgos.
- 7) Revisión de la Aceptabilidad del riesgo.

En la **Figura II.2.** se muestran las etapas resumidas de un análisis de riesgos.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura II.2. Etapas del Análisis de Riesgos⁽²⁹⁾.

II.E. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS

Existen varias técnicas de identificación y evaluación de riesgos que han demostrado ser eficientes en la práctica profesional desde hace varios años, sin embargo, estas técnicas difieren en la forma de rastrear y evaluar los riesgos en una unidad de proceso y en la aportación de resultados para eficientizar su operabilidad. Una vez identificado el riesgo es probable que se tomen las medidas necesarias para reducirlo, incluso si la evaluación cuantitativa es defectuosa. Los métodos de identificación de riesgos se dividen en las tres categorías que se aprecian en la **Tabla II.6**.

II.E.1. MÉTODOS COMPARATIVOS

Se basan en la experiencia acumulada, de varios años, de las personas involucradas directamente con los procesos en determinadas áreas.

Estas técnicas son comparativas para la identificación de riesgos y se usan para evaluar la seguridad de una planta de procesos. La mayoría de las plantas químicas, de refinamiento y petroquímicas han elaborado manuales técnicos internos que indican como diseñar, fabricar, distribuir, instalar, operar, modificar y desmantelar los equipos de procesos. Estos manuales siempre cumplen con la legislación local nacional y con estándares de las distintas ramas de ingeniería, en forma de códigos y normas (ASME, ASTM, API, NFPA, TEMA, etc.). Estos últimos, se complementan con la experiencia de las plantas, documentada en dichos manuales técnicos internos.



CLASES DE ANÁLISIS DE RIESGOS	EJEMPLOS
● <i>Métodos comparativos</i>	<ul style="list-style-type: none">• Códigos, estándares y normas• Listas de comprobación (checklists)• Análisis histórico de accidentes
● <i>Índices de riesgo</i>	<ul style="list-style-type: none">• Índice Dow• Índice Mond
● <i>Métodos generalizados</i>	<ul style="list-style-type: none">• Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (FMEA).• Análisis de Árbol de Sucesos (ETA).• Análisis de Error Humano.• Análisis "What-If".• Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP).• Análisis de Árbol de Fallas (FTA).• Análisis de Consecuencias o Efectos.

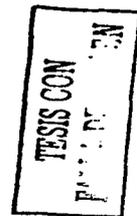


Tabla II. 6. Clasificación de las Técnicas de Análisis de Riesgos⁽¹⁾.

i. Códigos, estándares y normas

El procedimiento que se debe seguir al aplicar esta técnica es el siguiente:

- o Utilizar los manuales técnicos internos que están disponibles.
- o Usar los códigos y estándares de ingeniería para la evaluación y confiabilidad del diseño.

Si se detectan diferencias en el diseño con respecto a los requerimientos documentados, se deben de investigar las razones por las cuales no se siguieron los procedimientos usuales y establecer las medidas correctivas si estas son necesarias.

ii. Lista de comprobación o verificación (checklist)

Tiene como principal objetivo el mejorar la confiabilidad y el desempeño de los que laboran en la planta, ya sea durante las distintas etapas de un proyecto o en el proceso en sí, y también se utilizan para asegurar el eficaz cumplimiento de las legislaciones, leyes y normas que se involucran en el proceso.

La lista de comprobación es un método comparativo de identificación de riesgos que requiere la experiencia acumulada por una organización industrial y es un recordatorio útil que permite comparar el estado de un sistema con una referencia externa establecida para garantizar su funcionamiento, identificando directamente carencias de



seguridad ó áreas que requieren un estudio de riesgos más profundo. Esta lista puede ser aplicada para la evaluación de equipos, materiales ó procedimientos. En ella se realizan preguntas acerca de la organización, operación, mantenimiento y otras áreas importantes de la planta.

La metodología de esta técnica consiste en examinar cada uno de los elementos de un sistema y el resultado de esta supervisión es anotado en la Lista de Verificación.

Las ventajas que presenta esta técnica son:

- ✓ Se considera el método más sencillo para la identificación de riesgos.
- ✓ Sus resultados son cualitativos.
- ✓ Permite la evaluación del grado de cumplimiento de los procedimientos.
- ✓ Permite la identificación de riesgos potenciales.
- ✓ Permite evaluar y comprobar por separado, el estado de los elementos del sistema.
- ✓ Puede ser usada por el personal calificado de nivel promedio, adiestrado de la forma correcta para que la apliquen de forma correcta.
- ✓ Es basada en reglas escritas, es decir, se tiene que seguir un formato para realizar una serie de acciones, las veces que sea necesario.
- ✓ Proporciona una documentación sencilla del estado en el que se encuentra(n) el(los) elemento(s) inspeccionados, pero no establece categorías entre ellos.

Las desventajas que presente esta técnica:

- * No proporciona relación de las interacciones que pudiesen existir entre sistemas y subsistemas.
- * Debido a que se analiza un elemento cada vez, muchas veces no se visualizan los riesgos generados por interdependencias o interacciones entre elementos de proceso y procedimientos.
- * Limita el campo de análisis al atributo inmediato, restringiendo al personal en el empleo de sus capacidades de identificación de riesgos potencialmente peligrosos (imaginación, intuición, creatividad)
- * La principal desventaja es que, se ve completamente afectada por la experiencia de quién o quienes la realizan, ya que se pueden pasar por alto elementos críticos importantes que requieren de análisis más profundos.



iii. Análisis histórico de accidentes

Este tipo de análisis usa la información de accidentes ocurridos. Los peligros identificados durante el análisis son reales, siendo esto su principal ventaja y a la vez su principal desventaja, debido a que durante este análisis se toman en cuenta sólo las causas que provocaron el accidente y no considera todas las posibilidades importantes que pudieron haberlo materializado. Además, la información disponible sobre un accidente es limitada, ya que estos, en muchos de los casos, se registran incompletamente o no se registran. Esto último, debido a que muchos de los riesgos potenciales que pudieron haber tenido consecuencias catastróficas no se transformaron en accidente potencial, por circunstancias afortunadas. Aún con sus desventajas, el Análisis histórico de accidentes es útil porque identifica peligros concretos, lo que permite a las plantas iniciar un análisis de riesgos más profundo para tomar la decisión, con base a su probabilidad de ocurrencia y su magnitud de daño, de aceptarlo o no.

Al llevar a cabo un estudio de los accidentes registrados en instalaciones similares o con productos idénticos o de la misma naturaleza, como se hace en un Análisis Histórico, conduce a que las principales fuentes de investigación para realizarse sean:

- Fuentes bibliográficas especializadas.
- Bancos de datos de accidentes.
- Registros de accidentes de las empresas o las asociaciones empresariales.
- Registros de accidentes de las autoridades competentes.
- Informes o peritajes.

Los beneficios que ofrece esta técnica son:

- ✓ Poco costosa.
- ✓ Útil para la estimación cuantitativa.
- ✓ Extremadamente útil en el procesamiento de productos de uso frecuente o masivo.

Obviamente la principal desventaja que presenta es la búsqueda de información bibliográfica, la cual muchas veces es somera e inexacta. Es por eso, que en la **Tabla II.7.** se presentan los principales bancos de datos de accidentes y sus características.



II.E.2. ÍNDICES DE RIESGOS

Los índices de riesgos proporcionan un método directo y relativamente simple para estimar el riesgo global asociado a un área de proceso y jerarquizan las áreas conforme a su nivel de riesgo. Proporcionan un valor numérico que permite identificar áreas en las que el riesgo potencial alcanza un nivel determinado. Con base a este nivel se toma la decisión de hacer un análisis más profundo aplicado técnicas más específicas, como por ejemplo, HAZOP, Árbol de fallas, etc. Los índices de riesgos son útiles, porque proporcionan una estimación rápida y confiable del orden de magnitud del riesgo de un área determinada.

i. Índice Dow (de incendio y explosión)

El índice Dow proporciona un método directo y relativamente simple de estimar el riesgo global asociado con una unidad de proceso y es utilizado en la jerarquización de las unidades basándose en su nivel general de riesgo. Evalúa la existencia de peligros que puedan generar incendios y explosiones en grandes zonas de una planta de proceso.

Las etapas para llevar a cabo este estudio son:

- 1) Dividir el proceso en diferentes unidades a las cuales les son asignados valores que se basan en la naturaleza química y física de las sustancias, condiciones a las que son sometidas durante el proceso, equipos, etc.
- 2) Después se determina el Factor Material (MF), el cual es un valor relativo, comprendido entre 1 y 40, el cual es asignado a la(s) sustancia(s), de acuerdo con el potencial que tengan para liberar energía en un incendio o una explosión. Se ha elaborado una lista de sustancias usadas muy comúnmente en la industria, en la cual se puede buscar el MF, y en la cual pueden encontrarse otras características de estas sustancias como calores de reacción, índices NFPA, peligros a la salud, inflamabilidades (Nf), reactividades (Nr), temperaturas de evaporación súbita o flasheo y las temperaturas de ebullición.
- 3) Después se determinan los factores de riesgo que pueden existir y las combinaciones posibles. Factores como la presencia de reacciones exotérmicas y el embarque y desembarque de sustancias potencialmente peligrosas son determinantes para asignar magnitud a los incidentes.
- 4) Otros factores importantes, como la manipulación de sustancias a temperaturas cercanas a la de inflamabilidad y presiones diferentes a la atmosférica, también son



CAPÍTULO DOS: PERSPECTIVA TEÓRICA.



NOMBRE	PERIODO QUE ABARCA	CARACTERÍSTICAS GENERALES	OTROS DATOS
<i>OSIRIS I</i>	1970-1990	Procedencia de los datos: General País: Italia Idioma: Inglés Tipo de Accidentes: Con sustancias peligrosas (incluye transportación e instalaciones)	• Consulta y respuesta por fax o disquete magnético
<i>OSIRIS II</i>	1977-1992	Procedencia de los datos: Oil Spill Interlligence Report País: Italia Idioma Inglés Tipo de Accidentes: Con hidrocarburos	• Consulta y respuesta por fax o disquete magnético • Actualizado anualmente • Recopila todos los datos del mundo
<i>MHIDAS</i>	De forma continua desde 1985, recopilando datos desde 1966 con algunos importantes anteriores a la fecha	Procedencia de los datos: Fuentes Públicas generales País: Reino Unido Idioma: Inglés Tipo de Accidentes: Con sustancias peligrosas (incluye almacenamiento, transportación y procesos principalmente para la industria química y petroquímica. No incluye accidentes en plataformas petrolíferas, minas ni con sustancias nucleares)	• Obtención de información por: A) Contacto directo B) Consulta On-line C) CD-Rom
<i>ACTS</i>	1980	Procedencia de los datos: Fuentes Públicas generales investigaciones propias, informes técnicos de compañías privadas y organismos regionales País: Holanda Idioma: Inglés Tipo de Accidentes: Con sustancias peligrosas (incluye almacenamiento, transportación, carga y descarga, proceso y uso)	• Consulta off line disponible en disquete de PC • Se actualiza anualmente
<i>SONATA</i>	Accidentes anteriores a 1930	Procedencia de los datos: Fuentes públicas País: Italia Idioma: Inglés Tipo de Accidentes: Idem.	• Ha dejado de actualizarse
<i>MARS</i>	1984	Procedencia de los datos: Información pública sobre los accidentes en instalaciones de los países de la Comunidad Europea afectados por la directiva Seveso, Banco de datos de accidentes notificados a la comisión de la CEE para la aplicación de la directiva Seveso. Idioma: Inglés Tipo de Accidentes: Idem.	• En 1991 se publica un informe acerca de las enseñanzas adquiridas en estos accidentes. • Actualmente en proceso de actualización • Contiene 121 casos

Tabla II. 7. Bancos de datos de Accidentes para Análisis Históricos (1).





factores que contribuyen cuando es asignada la probabilidad del incidente. Y es que, estos factores son las principales causas de incidentes en los que hay presencia de fuego y explosiones.

- 5) Se realiza un conteo de riesgos presentes, en el cual se asigna una penalización en diferentes rubros, lo que permite obtener dos factores diferentes: El primero, Factor de Riesgos Generales, que es calculado:

$$FRG = 1 + \text{penalización por cada uno de los riesgos generales}$$

Y el Factor de Riesgos Especiales para el Proceso:

$$FREPP = 1 + \text{penalización por cada uno de los riesgos especiales}$$

- 6) Después de haber estimado estos dos factores, los valores obtenidos se usarán para calcular el Factor de Riesgo en la Unidad, que es el producto de los dos anteriores. Generalmente, el valor obtenido oscila entre 1 y 8. Un tercer cálculo es utilizado para obtener el valor del Índice de Fuego y Explosibilidad (IFE) que resulta del producto del Factor de Riesgo y del Factor Material.

Este método no se utiliza para señalar riesgos individuales, sino que proporciona un valor numérico que permite identificar áreas en las que el riesgo potencial alcanza un nivel determinado. Sobre estas áreas puede, en caso de ser necesario, hacerse un análisis de riesgos más detallado, aplicando una técnica generalizada, por ejemplo, la técnica HAZOP, por lo que el valor numérico obtenido puede ser de utilidad a la hora de decidir la profundidad del estudio.

El índice Mond es similar al índice Dow con la diferencia de que el primero incluye aspectos de toxicidad, sin embargo, la última edición del índice Dow toma en cuenta, aunque ligeramente, aspectos de toxicidad y es más fácil de conducir por el uso de gráficos y ecuaciones. Para hacer un índice Dow se requiere la siguiente información:

- a) Plano de distribución de la planta (plot plan).
- b) Diagrama de flujo de proceso (DFP).
- c) Condiciones de operación y de flujo.
- d) Formato de trabajo del índice Dow.
- e) Relación de costos del equipo instalado en la planta.



ii. Índice de Incendio, Explosión y Toxicidad (Mond)

Este índice es similar al anterior y, además, incluye la toxicidad de materiales. No obstante, el índice Dow permite una estimación más fácil, debido al uso de gráficos frente a ecuaciones que permiten la inclusión de aspectos de toxicidad, mediante una penalización específica.

Las ventajas que proporciona son:

- ✓ Relativamente sencillo, y lo puede realizar personal técnico que se le proporcione poco entrenamiento específico en I.M.
- ✓ Es aplicable en cualquier etapa de la vida útil de la planta.
- ✓ Es un método rápido para evaluar las condiciones potencialmente peligrosas de fuego o explosión de algún proceso.
- ✓ Proporciona evaluación toxicológica de las sustancias que se estudian.
- ✓ Complementándose con factores financieros, puede proporcionar el potencial de riesgo en términos monetarios.
- ✓ Muy útil en las fases de planeación e ingeniería de proyectos.
- ✓ Muy útil en la etapa de Análisis de Riesgos de una planta en funcionamiento.
- ✓ Sólo requiere datos físicos y químicos de las sustancias que se analizan.
- ✓ En este estudio no son necesarios planos detallados de la planta ni del proceso, pero sí requiere datos detallados de los inventarios máximos de los materiales, condiciones variantes en el proceso y un diagrama de distribución del área de almacenamiento y de proceso que sea detallado y confiable.

Las desventajas que se presentan son:

- * No proporciona un Análisis de Riesgos detallado, sino que complementa a otras metodologías.
- * Es un método relativista, por lo cual es recomendable que, en evaluaciones de nuevos procesos o tecnologías se empleen métodos más sistematizados, por ejemplo el Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP).
- * Para comparar los resultados de este método aplicado a distintas áreas de la planta, será necesario que todos los estudios sean realizados por el mismo grupo de estudio, ya que se corre el riesgo de que, por ser un método



relativista, no se consideren con los mismos parámetros situaciones similares en todas las áreas.

- * La experiencia del grupo asignado para realizar el análisis, deberá ser lo más amplia posible, ya que de no ser así, se pueden presentar situaciones de subjetividad, lo que se reflejaría en la ponderación de valores numéricos.

II.E.3. MÉTODOS GENERALIZADOS

Los métodos generalizados proporcionan esquemas de razonamiento más sistemáticos y son herramientas de análisis más versátiles y útiles.

i. Análisis de modos de fallas y sus efectos (FMEA)

A principios de la década de los 60's fue desarrollada la metodología conocida como Failure Modes and Effects Analysis, la cual es considerada como la formalización de la técnica conocida como "What if...", es decir, se transformó para poder ser utilizada en procesos y sistemas industriales más complejos.

El Análisis de modos de fallas y sus efectos, FMEA, tiene como principal objetivo el documentar y organizar los datos que se conocen acerca de los efectos de fallas de los componentes de un sistema.

El análisis FMEA consiste en un examen de componentes individuales con el objetivo de evaluar el efecto que una falla de estos mismos pueda tener sobre el sistema. Es un análisis sistemático, que se realiza poniendo énfasis en fallas de funcionamiento de componentes. En el contexto de este análisis, una modalidad de falla es un síntoma, una condición o un modo de operación asociado a la falla del componente. El modo de la falla puede identificarse como una pérdida de la función del componente, funcionamiento prematuro, funcionamiento fuera de tolerancia o una característica física indeseada. En el análisis FMEA todas las formas conocidas de falla de los componentes se consideran por turnos y las consecuencias de la falla son analizadas y registradas.

Para llevar a cabo el FMEA se requiere de los siguientes componentes:

- a) Diagramas de tubería e instrumentación.
- b) Diagramas eléctricos.
- c) Procedimientos de operación
- d) Diagramas de lógica instrumental.



e) Información sobre controles e interdependencia.

El equipo de trabajo debe tener la información suficiente para comprender el diseño y la operación de un componente y su interacción con el sistema del que forma parte. Como siguiente paso se debe definir un formato adecuado para el estudio, con esto se logra una mayor coherencia en el análisis.

Las ventajas que ofrece:

- ✓ Tiene un fácil desarrollo al nivel de componente que le sea asignado.
- ✓ Para interpretarlo, no es necesario que el personal sea adiestrado previamente.
- ✓ Se requiere de poco tiempo en el caso de que se solicite un estudio detallado.
- ✓ Se pueden identificar rápida y fácilmente fallas de alta gravedad.

Las principales desventajas que presenta son:

- * Debido a que es desarrollado al nivel de componentes, se pueden dejar de lado las interacciones que existen entre otros componentes o entre sistemas.
- * No proporciona la suficiente cuantificación uniforme en cuanto a los efectos del sistema.
- * Se requiere de mucha experiencia por parte del grupo de análisis.

ii. Análisis de árbol de sucesos (ETA)

Esta técnica surge de un suceso determinado e investiga mecanismos razonables mediante los cuales éste puede tener lugar. El análisis de árbol de sucesos (Event Tree Analysis) evalúa las consecuencias que puedan tener lugar a partir de un suceso determinado. El ETA hace énfasis en un suceso inicial que supone que ha ocurrido, se construye el árbol lógico que conecta dicho suceso inicial con los efectos finales, donde cada rama del árbol representa una línea de evolución que conduce a un efecto final o bien se anula la secuencia de circunstancias evitando el efecto final. Entre las ventajas con las que cuenta están:

- ✓ Muestra de forma gráfica los posibles resultados del accidente que se estudia.
- ✓ Se pueden estudiar procesos complejos que tienen varias capas de sistemas de seguridad.



- ✓ Permite el estudio de diferentes escenarios y el establecimiento de una estructura jerárquica, pues se toma en cuenta la severidad y frecuencia con la que ocurre.
- ✓ Se pueden seleccionar los escenarios de emergencia para evaluarlos de forma cuantitativa y proponer maneras de respuesta adecuada.

Entre las desventajas que presenta se encuentran:

- * Considera únicamente las respuestas del sistema de seguridad y de los operadores al evento iniciante.
- * Los resultados son secuencias de accidentes, conjuntos de fallas o errores que conducen al accidente.

iii. Análisis de error humano

La mayoría de los accidentes que implican daños, muertes o pérdidas materiales son atribuibles en buena medida a los errores de tipo humano. Estos errores pueden presentarse durante cualquier etapa de la vida de un proceso, es por eso que nace esta técnica.

El análisis de error humano es una evaluación sistemática de los factores que influyen en el comportamiento y desempeño del personal de la planta. Durante el análisis se buscan los factores físicos y ambientales involucrados en el trabajo como habilidades, nivel de conocimiento, adiestramiento, etc. El propósito de este análisis es localizar áreas ó situaciones en las cuales la persona encargada está expuesta a tomar decisiones impropias que podrían conducir a un evento indeseable.

Los resultados de un análisis de error humano son:

- Una lista de errores humanos que podrían ocurrir durante las operaciones normales y de emergencia.
- Una lista de factores que contribuyen a cometer errores.
- Lista de recomendaciones propuestas para eliminar o reducir dichos errores.
- Interfases del sistema que fueron identificadas y que son afectadas por errores particulares, jerarquizadas de acuerdo a la probabilidad de frecuencia y de la magnitud de las consecuencias que conlleve.

La información que se requiere para realizar un análisis de error humano es la siguiente:



- a) Procedimientos de operación normal y de emergencia.
- b) Conocimiento del nivel de capacitación y adiestramiento a los empleados.
- c) Descripción de tareas y arreglo de los tableros de control y alarmas.
- d) Características físicas y ambientales del puesto.

Entre las ventajas que ofrece se encuentran:

- ✓ Sus resultados son fáciles de actualizar en el caso de que se presenten cambios de diseño o modificaciones en la planta o el proceso.
- ✓ También se pueden actualizar sus datos en caso de que se presenten cambios en los sistemas de adiestramiento o entrenamiento.

Y las desventajas:

- * Las situaciones y medidas que se lleven a cabo para disminuir los riesgos, podrían cambiar de una temporada a otra, y de persona en persona.
- * Áreas ó situaciones en las cuales la persona encargada está expuesta son la mayoría de las veces específicas en cada persona, y por consiguiente, le afecta de forma distinta.
- * También las características físicas y ambientales de cada puesto son muy variantes para cada persona y en distintas épocas.

iv. Análisis "What-if?" ("¿Qué pasa si...?")

Este método, por medio de un proceso especulativo, emplea la técnica denominada "Tormenta de Ideas", en el cual, un grupo interdisciplinario de expertos familiarizados con el proceso de estudio tiene que responder la pregunta: "¿Qué pasa si...?" aplicándola a una serie de elementos que poseen un potencial de riesgo. Dichos elementos pueden ser instalaciones del sistema o procedimientos de operación.

Además, el estudio What-if es un método menos estructurado comparado con el análisis de Modo de Falla y sus Efectos, el Estudio de Riesgos y Operabilidad, etc. Debido a esta falta de estructuración, se requiere mayor experiencia por parte de las personas que lo aplican.



El objetivo de un estudio What-if es buscar consecuencias de posibles eventos no deseados y es aplicado en el diseño, construcción, modificación y operación de instalaciones industriales. Este método requiere la siguiente información para ponerlo en práctica:

- a) Diagramas de tuberías e instrumentación (DTI's).
- b) Procedimientos de operación.

Las ventajas que presenta son:

- ✓ Es un método que puede ser usado en cualquier etapa del proyecto.
- ✓ Puede ser usado frecuentemente en las plantas de proceso, donde se estén realizando modificaciones o mejoras del proceso.
- ✓ Los riesgos que se identifican son a corto plazo o accidentales.
- ✓ Se puede implementar a sistemas completos o a subsistemas de éste, de acuerdo a las conveniencias del análisis.

Algunas de las desventajas que tiene:

- * Es una técnica especulativa.
- * Debido a que no se encuentra estructurado, es necesaria mucha experiencia por parte del grupo que lo realice.
- * No detecta riesgos a mediano y largo plazo.

v. Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP, por sus siglas en inglés)

El HAZOP (del inglés: Hazard & Operability Analysis), es una técnica que fue desarrollada para identificar riesgos y mejorar la operabilidad de una planta de procesos. Las principales razones por las que se lleva a cabo es para verificar un diseño, decidir la zona donde será construida una planta química, decidir acerca de la adquisición de algún equipo, instrumento o sistema, verificar los instructivos y procedimientos de operación y mantenimiento, mejorar las condiciones de seguridad de una planta de proceso, etc.



Esta técnica puede ser usada durante el diseño, modificación u operación de una instalación, usando una lista de palabras guías que facilitan la identificación de las desviaciones del proceso, diseño u operación que puede ocurrir en el nodo de estudio.

El principio del estudio HAZOP es la suposición de que los problemas o riesgos de operación, aparecen como consecuencia de las desviaciones de las condiciones normales en una determinada etapa de la planta, este se puede aplicar en la etapa de diseño como si ya estuviera construida la instalación.

También podemos decir que el HAZOP es una forma estructurada del análisis What-If. En esta técnica la imaginación ejerce un papel importante, pues se requiere revisar todas las formas posibles en que los riesgos pueden surgir.

Las etapas que contempla son:

- 1) Definición del objetivo y el alcance.
- 2) Selección del grupo de trabajo.
- 3) Actividades previas al análisis.
- 4) Desarrollo práctico del trabajo.
- 5) Actividades de seguimiento.
- 6) Registro de los resultados.

Los elementos básicos necesarios para arrancar este análisis son:

- a) Una persona que esté entrenada y con experiencia en este tipo de estudios, la cual dirija el estudio y haga el papel de facilitador. Esta persona debe también tener conocimientos básicos del proceso y deberá promover la discusión y participación del equipo multidisciplinario. El facilitador deberá de contar con un secretario. Este secretario estará encargado de registrar las decisiones que han sido tomadas por el grupo de trabajo, algo que se hace de vital importancia, sobre todo cuando el estudio se torna complicado y el facilitador debe de guiar al grupo usando simultáneamente varias fuentes de datos.
- b) Equipo multidisciplinario conformado por las siguientes integrantes: un ingeniero de proyectos, un ingeniero de proceso, un ingeniero instrumentista, un ingeniero de mantenimiento (mecánico y eléctrico), un ingeniero de mantenimiento de plantas y un ingeniero encargado de la seguridad industrial.



c) Los Diagramas de Tuberías e Instrumentación completos.

Una ventaja que tiene es que, al ser sistemático, se reducen las posibilidades de que algo quede sin ser analizado. Otras ventajas son:

- ✓ Cada vez que una desviación razonable es identificada, se analizan sus causas, consecuencias, salvaguardas y posibles acciones correctivas.
- ✓ Debe de ser realizado por un grupo interdisciplinario, el cual aporte con sus experiencias en distintas ramas de la planta
- ✓ Al ir avanzando en el análisis, se van proponiendo soluciones que se formulan desde diferentes puntos de vista profesional
- ✓ La imaginación de los participantes es liberada, pues aunque hay eventos que tienen altas posibilidades de suceder, existen otros que requieren de experiencia complementada con imaginación

Metodología para el estudio HAZOP

El coordinador o facilitador del grupo debe ser experimentado, ya que sistemáticamente guiará al equipo a través del diseño de la planta usando una serie de palabras guía. Estas palabras son aplicadas a circuitos y más específicamente a nodos, y serán combinadas con parámetros específicos del proceso para identificar desviaciones potenciales de la planta en operación.

Se denomina circuito a la sección de una planta de proceso específica, la cual está bien delimitada y tiene características en el mismo proceso bien definidas por equipos y por segmentos de tubería. Por otro lado, se le llama nodo a las secciones de circuitos, las cuales lo componen y se caracterizan por ser segmentos de tuberías únicamente.

En la **Figura II.3.** se muestra un diagrama con las principales etapas del Análisis HAZOP.

El grupo Interdisciplinario debe encargarse de llevar a cabo las siguientes actividades:

Establecer las reglas a seguir

- En esta etapa se debe de llegar a un consenso acerca de los horarios, sede, materiales, participación, etc. por parte de todos los integrantes del grupo.



- También se debe hacer hincapié en que todos deben de participar de forma activa en las secciones, sin importar jerarquías o áreas en las que se labore.

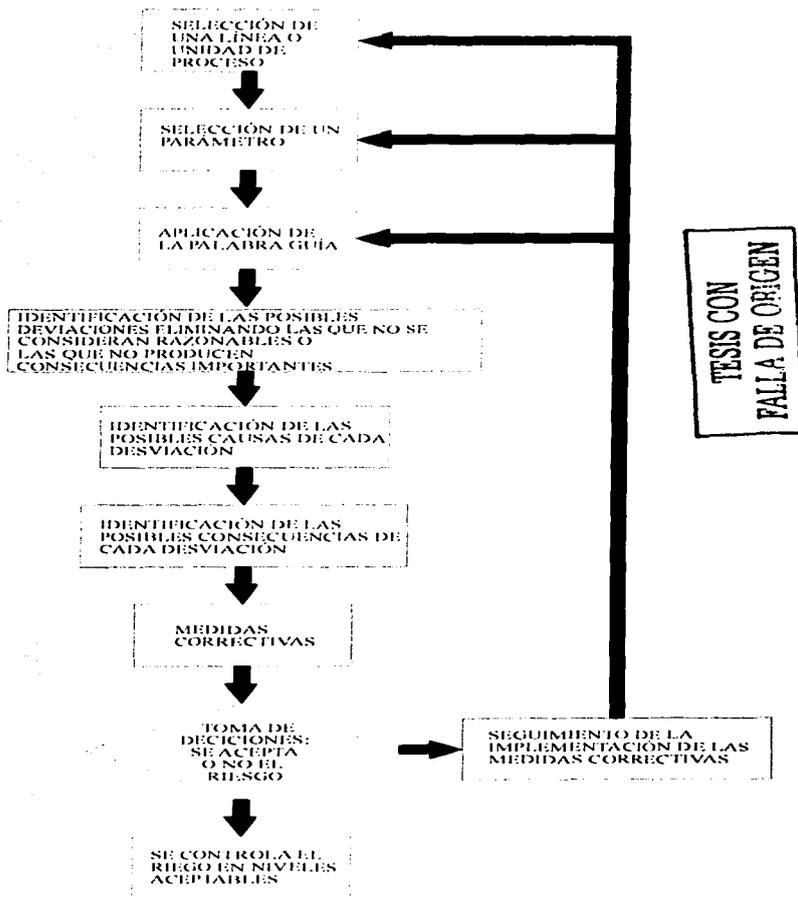


Figura II.3. Diagrama de Flujo de la Técnica HAZOP⁽²¹⁾.



- También se debe hacer hincapié en que todos deben de participar de forma activa en las secciones, sin importar jerarquías o áreas en las que se labore.
- Habrá que evitar las confrontaciones entre los diferentes puntos de vista de cada uno de los asistentes. Aquí el facilitador deberá de tener el tacto y la habilidad necesaria para poder incluir todas las opiniones.

Recopilación previa de información

- Obtener el conocimiento pleno del proceso (tanto físico como químico). Conocer y tener a la mano los procedimientos normativos internos, la normatividad local y Nacional, y estándares internacionales.
- Revisar los registros históricos de incidentes ó accidentes así como también los registros de calibración y prueba de líneas y válvulas de relevo (PSV's).
- Toda esta información deberá estudiarse (con el fin de conocer el proceso operativo) y revisarse de acuerdo a las normas y estándares que apliquen (con el fin de establecer recomendaciones específicas durante y al final del estudio, evitando generalidades).

Selección del (los) circuito(s) que aporten mayores elementos para el análisis

- Seleccionar los circuitos (en orden jerárquico) en los que se aplicará la técnica HAZOP.
- Revisar y actualizar (sí es necesario) los Diagramas de Tubería e Instrumentación (DTI's) y los Diagramas de Flujo de Proceso (DFP's) para cada circuito seleccionado, así como también revisar las hojas de datos de equipo y líneas. Realizar un recorrido en el área con el grupo HAZOP, con el fin de observar las condiciones de seguridad en el circuito a analizar.

Identificar los escenarios potenciales de accidentes

- Seleccionarán un(o unos) de (los) circuito(s) de la planta que sea(n) representativo(s) para posteriormente dividirlo en nodos.
- Seleccionarán la desviación que se pueda aplicar a la planta.



- Identificarán las posibles desviaciones, rechazando aquellas que no se consideren razonables, o las que no den lugar a consecuencias importantes.
- Identificarán las posibles causas, además de las consecuencias de cada desviación.
- Durante la aplicación de la técnica es posible determinar, además de las desviaciones, causas, consecuencias, salvaguardas, recomendaciones o acciones, los límites de operación seguros (de temperatura, presión, nivel, etc.), las cuales es conveniente registrarlas para que más adelante sean discutidas con detalle.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Palabras guía

Estas palabras son aplicadas a circuitos y más específicamente a nodos, las cuales son combinadas con parámetros específicos del proceso para identificar desviaciones potenciales de la planta en operación. En la **Tabla II.8.** se presentan la aplicación de palabras guía y algunos ejemplos.

PALABRA GUÍA	APLICACIÓN	EJEMPLOS
NO	La completa negación de la intención del diseño. Ninguna parte de la intención se logra.	<ul style="list-style-type: none"> • El procedimiento no se lleva a cabo • No hay flujo de inhibidor de corrosión
MÁS / MENOS	Aumento o disminución cuantitativa sobre la intención de diseño. Se refiere a cantidades y propiedades físicas.	<ul style="list-style-type: none"> • La presión que se tiene es menor a la presión de operación • Aumento de la concentración de alguna sustancia corrosiva dentro de tuberías
ADEMÁS DE/ TAMBIÉN CÓMO	Se consiguen las intenciones de diseño, además de ocurrir algo más.	<ul style="list-style-type: none"> • El vapor consigue calentar al reactor, además, eleva la temperatura en otros equipos • La corrosión, además de atacar la tubería, ataca a otros equipos
PARTE DE	Disminución cualitativa. Sólo parte de la intención se logra.	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo se lleva a cabo una de las reacciones previstas • Parte del flujo se pierde debido a fugas por corrosión
INVERSO	Se obtiene el efecto contrario al deseado.	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene flujo inverso • Se obtiene reacción inversa

Tabla II.8. Palabras Guía utilizadas en el Análisis HAZOP²⁹.

El estudio se basa en la aplicación de los parámetros más representativos de la planta y las palabras guía más adecuada para que se cubra en su totalidad al proceso y así identificar las posibles desviaciones.

Cuando se combinan las palabras guía con los parámetros se obtiene una matriz



generalizada de posibles desviaciones, la matriz es mostrada en la **Tabla II.9.**

Evaluación de los niveles de riesgo

Después de localizar las desviaciones con la aplicación de las palabras guía y en combinación con el parámetro deseado, se procede a evaluar los niveles de riesgo de las causas identificadas tomando como base la frecuencia y la gravedad. El equipo multidisciplinario aplica sus conocimientos para clasificar el nivel de frecuencia y gravedad de las consecuencias.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

	NO	INVERSO	MÁS	MENOS	TAMBIEN CÓMO	PARTE DE	OTRO QUE
FLUJO	Ausencia de flujo	Retroceso de flujo	Aumento en el flujo	Disminución en el flujo	Flujo contaminado	Sin la composición adecuada	Sustancia o material equivocado
PRESIÓN	Vacío	No Aplica	Mayor presión	Menor presión	Golpe de ariete	No Aplica	Fugas
TEMPERATURA	No Aplica	No Aplica	Alta en la Temperatura	Baja en la Temperatura	Oxidación	Gradiente	No Aplica
VISCOSIDAD	No Aplica	No Aplica	Aumento de la viscosidad	Disminución de la viscosidad	No Aplica	Cambio de fase	No Aplica
NIVEL	Recipiente vacío	No Aplica	Aumento de nivel	Disminución del nivel	No Aplica	No Aplica	No Aplica
MEZCLA	No mezcla (sustancia pura)	No Aplica	Aumento de un componente e en la mezcla	Disminución de un componente en la mezcla	Espuma	No Aplica	No Aplica
REACCIÓN	No existe reacción	Existe reacción inversa	Reacción excesivamente rápida (se sale de control)	Reacción lenta (poco eficiente)	Existe cambio de fase	Hay reacciones secundarias	La reacción no es la correcta o la adecuada

Tabla II.9. Matriz generalizada de desviaciones detectadas en el Análisis HAZOP.



En las **Tablas II.10. y II.11.** se presentan los niveles de frecuencia de accidentes y de gravedad de sus consecuencias. Estas tablas son utilizadas para la clasificación que más adelante darán origen a la Matriz de Riesgos.

Basándose en las consideraciones de las dos tablas anteriores, se realizan recomendaciones que también son clasificadas de acuerdo a las prioridades de tiempo que se deban acatar para llevarlas a cabo.

NIVEL DE FRECUENCIA	SI SUCEDE:
1	No más de una vez en la vida de la planta
2	Hasta una vez en diez años
3	Hasta una vez en cinco años
4	Hasta una vez en un año
5	Más de una vez al año

Tabla II.10. Clasificación de los Niveles de Frecuencia⁽²⁰⁾.

TESIS CON
PARTICIPACIÓN

NIVEL DE GRAVEDAD	CUANDO LAS CONSECUENCIAS IMPLICAN QUE:
1	No existen daños al personal, al ambiente ni a instalaciones o equipos
2	Existen daños a los equipos o se han generado fugas menores
3	Existe personal de la unidad lesionado y la totalidad de los daños se encuentran en el interior de la planta
4	La destrucción y los daños son limitados, alcanzan el exterior de la planta
5	La destrucción y los daños son extensivos en el exterior de la planta

Tabla II.11. Clasificación de los Niveles de Gravedad⁽²⁰⁾.

La matriz de índices de riesgos

Basándose en las consideraciones de las dos tablas anteriores, se realizan recomendaciones que también son clasificadas de acuerdo a las prioridades de tiempo que se deban acatar para llevarlas a cabo.

Quando se tienen categorías de frecuencias y consecuencias para los accidentes que han sido detectados en el análisis HAZOP, se les pueden asignar calificaciones de riesgo según sean las recomendaciones que se hayan formulado. El resultado puede ser una Matriz de Riesgos, la cual representa las consecuencias de los daños a los equipos y las instalaciones.

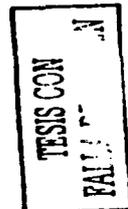
La Matriz de Riesgos se forma a partir de los niveles de riesgo, que son el nivel de frecuencia y nivel de gravedad. Después el equipo multidisciplinario clasificará las recomendaciones según su nivel de riesgo, el cual fue establecido por el equipo multidisciplinario.



Con la matriz y el índice o número de riesgo podemos tomar decisiones sobre la aceptabilidad o no del riesgo, o bien asignar prioridades a las acciones recomendadas. Cuando la matriz establezca las prioridades de las recomendaciones a implementar, deberá combinar la probabilidad de ocurrencia de un accidente y la severidad o gravedad de las consecuencias del mismo.

En una Matriz de Riesgos podemos definir tres regiones de riesgos:

- Una de riesgo pequeño, en la cual no es necesario ningún tipo de estudio posterior.
- Otra de riesgo marginal o intermedio. En ella, los riesgos que contiene requieren de un estudio más detallado (Estudio Costo-Beneficio).
- Existe una tercera zona, en la cual los riesgos que contiene son potencialmente altos y por lo tanto inaceptables. Se requieren de estudios más detallados y profundos, estimando los costos necesarios para la implementación de las medidas que eliminen o reduzcan al riesgo.



En la **Tabla II.12.** se presentan estas tres categorías más detalladamente.

CLASE	CARACTERÍSTICAS
A	Recomendaciones de alta prioridad. Requieren de acción inmediata para disminuir la probabilidad de ocurrencia del accidente ó mitigar sus consecuencias. Tienen un índice de riesgo de 8 a 10.
B	Recomendaciones de prioridad media. Se evaluara, con un análisis de costo-beneficio, y se tomara la decisión de si se acepta el riesgo o no. Tiene un índice de riesgo que va de entre 4 y 7.
C	Recomendaciones de baja prioridad. El proceso seguirá laborando con normalidad si no es implementada, y de ser implementada mejorará las condiciones de seguridad de la planta. La puntuación que tiene en el índice de riesgo es de 1 a 3.

Tabla II.12. Clasificación de las recomendaciones generadas en el Análisis y utilizadas en la Matriz de Riesgos⁽¹⁾.

	Niveles de gravedad				
	1	2	3	4	5
Niveles de frecuencia	1	4	6	7	8
	2	4	6	7	
	3	4	6	7	
	4	4	7		
	5	5			

Figura II.4. Ejemplo de una Matriz de Riesgos y sus zonas según la clasificación de sus recomendaciones⁽¹⁾.



La matriz de la **Figura II.4.** muestra las tres zonas que se acaban de explicar.

Elaboración del reporte HAZOP

La forma más conveniente de que se vaya registrando la información es en un archivo de riesgos, el cual deberá contener:

1. Copia de todos los documentos generados por el estudio, y que han sido usados y marcados por el equipo de estudio. Estos pueden ser:
 - Diagramas de flujo.
 - Hojas de especificaciones.
 - Planos y modelos.
 - Instructivos de operación y mantenimiento.
 - Programas.
 - Normas y procedimientos.
 - Etc.
2. Copia de todos los papeles y notas de trabajo, conteniendo las preguntas, sus posibles respuestas, recomendaciones, modificaciones al diseño original, etc.
3. De ser posible, lo más conveniente es que el archivo se retenga en el interior de la planta.

Se requiere de información que represente por completo el estado actual de una planta (cuando el estudio se realiza en la etapa de operación)

Antes de iniciar un estudio HAZOP es importante revisar la información que regularmente se usa para asegurar la calidad del estudio y prevenir riesgos; en orden de importancia: los procedimientos operativos y de mantenimiento, el programa de revisión de instrumentos y detectores (protecciones), etc. Frecuentemente nos encontramos con procedimientos imprecisos, no actualizados, no difundidos correctamente y, además, archivados, los cuales conducen al personal encargado de aplicarlos a usar notas informales que, en muchos de los casos o en casi todos, provocan la omisión de pasos importantes de un procedimiento correcto.



vi. **Análisis por Árbol de Fallas (FTA)**

Basado en elementos propios del álgebra Booleana (**Ver Apéndice B**), el Árbol de Fallas, es un modelo gráfico en el cual se plasman los eventos intermedios que dan origen a un evento no deseado llamado "evento culminante". Al referirnos a eventos intermedios debemos entender que son fallas, que al combinarse dan origen al evento culminante, es decir, al accidente.

Los eventos culminantes son situaciones específicas que fueron detectadas por técnicas menos detalladas (por ejemplo Análisis "What if..." o HAZOP).

La técnica supone un suceso no deseado (un accidente o una desviación peligrosa de cualquier tipo, que ya ha o no ocurrido), y busca las causas del mismo y la cadena de sucesos que puede hacer que tenga lugar. El análisis de Árbol de Fallas descompone un accidente en sus elementos contribuyentes, ya sean fallas humanas o de equipos de planta, sucesos externos, etc.

En esta técnica existen tres áreas importantes para su estudio:

- a) El Riesgo: evento potencialmente peligroso. Debido a que los riesgos son inevitables, siempre existirá la posibilidad de que ocurran accidentes, por mínima que está sea.
- b) Existencia de eventos que, individualmente o de forma conjunta, pueden generar riesgos. Entre las principales causas de los Riesgos en las plantas Químicas se encuentran:
 - Fallas de equipo
 - Falta o fallas de mantenimiento
 - Fallas en los instrumentos
 - Adiestramiento inadecuado a operadores
 - Errores Humanos
- c) Sistemas de protección al proceso y a la planta ya que pueden fallar alarmas, válvulas de alivio, discos de ruptura, válvulas de venteo, sistemas automáticos de seguridad, etc.

Los eventos culminantes, es decir, accidentes, son descompuestos en un grupo de fallas, buscando las combinaciones que le dan origen. A los grupos de combinaciones



son llamados "conjuntos mínimos" y podemos definirlos como la asociación más pequeña de fallas que, si llegan a existir o suceder simultáneamente, el evento se presentará.

La probabilidad del evento culminante se determina sumando y multiplicando las probabilidades entre sí, tal como se hace con las variables del álgebra Booleana.

El resultado es una representación lógica en la que aparecen cadenas de sucesos capaces de generar el suceso culminante que ocupa la cúspide del árbol de fallas. Los resultados son cualitativos, sin embargo, pueden ser cuantitativos si los datos de la relación de fallas están disponibles para el evento.

Normalmente una persona puede ser asignada para elaborar un árbol de fallas para un accidente dado. Esta persona deberá de tener conocimiento del proceso que se lleva a cabo en la planta. La preparación de este árbol depende del tamaño y la complejidad del equipo.

Metodología para el Análisis de Árbol de Fallas

El Análisis de Árbol de Fallas consta de los siguientes pasos:

- 1) Identificación de la falla del sistema. A este evento lo designaremos "evento culminante" que será analizado y lo ubicaremos en la parte superior del árbol
- 2) En el siguiente nivel del sistema, que se denominara subsistema, identificaremos las fallas del subsistema que podrían conducir a la falla del sistema
- 3) Determinar la relación lógica entre las fallas del subsistema que son requeridas para producir la falla del sistema. Puede ser el resultado de la combinación de fallas o la acción individual de cada una de ellas
- 4) Usar la estructura lógica de puertas "Y" u "O" para mostrar la relación de fallas del subsistema que producen al evento cúspide. La "Y" significa que las frecuencias o probabilidades deben ser multiplicadas y la "O" significa que estas deben ser sumadas

NOTA: Según la lógica Booleana, en un conjunto de elementos, en este caso fallas, bastará con que exista una relación de conjunción (puerta "Y") entre dos de ellas para que la compuerta lógica del conjunto sea "Y".



- 5) Descender al nivel próximo inferior del sistema y repetir los pasos 2 al 4 hasta que se hayan identificado todas las fallas del nivel de componentes
- 6) Con datos de frecuencia o probabilidad de fallas en el nivel de componentes, computar la frecuencia o probabilidad de las fallas descritas en el nivel ubicado arriba del nivel de componentes usando las puertas "Y" u "O".
- 7) Seguir con la estructura lógica indicada por las puertas "Y" u "O" en el árbol de fallas hasta que la probabilidad de la falla del sistema o evento culminante haya sido calculada.
- 8) Cuando todas las secuencias razonables se han identificado y el árbol ha sido completado de la forma adecuada, el análisis de árbol de fallas es una herramienta muy poderosa en la cuantificación de riesgos y es uno de los análisis de riesgos más estructurados.

En la **Tabla II.13**, se muestran los nombres, significados y símbolos para las puertas usadas en el árbol de Fallas.

Esta técnica supone básicamente que, todos los eventos intermedios que dan origen al evento culminante suceden en un estado de falla o en el estado de realización de algún trabajo. Las fallas o faltas que aparecen en el diagrama del árbol se pueden agrupar en tres categorías: primarias (desperfectos de elementos o componentes que son sometidos a condiciones para las cuales no han sido diseñados), las cuales se atribuyen a defectos en el componente; secundarias (fallas de equipos que, al ser sometidos a condiciones que no corresponden a su diseño tienen fallas en su funcionamiento), que se atribuyen a causas externas ya que el equipo no está diseñado para esas condiciones; y las de comando (a pesar del buen funcionamiento de los elementos de proceso, no se logra la respuesta deseada debido a una mala operación o a un mal control).

A continuación se especifican algunas de las ventajas que posee:

- ✓ Puede aplicarse a un solo sistema o a sistemas interconectados.
- ✓ Debido a que se usa Álgebra Booleana, se reduce el manejo de variables, de una forma fácil y rápida.
- ✓ Toma en cuenta factores mecánicos y humanos.



CAPÍTULO DOS: PERSPECTIVA TEÓRICA.



NOMBRE DE LA COMPUERTA LÓGICA	APLICACIÓN	SÍMBOLO
<u>SUCESO INTERMEDIO</u>	Resultan de la interacción de otros sucesos que a su vez se desarrollan mediante puertas lógicas	
<u>SUCESOS BÁSICOS</u>	Constituyen la base de la raíz del árbol. No necesitan desarrollo posterior en otros sucesos	
<u>SUCESOS NO DESARROLLADOS</u>	No son sucesos básicos y podrían desarrollarse aun más, pero el desarrollo no se considera necesario, o no se dispone de la suficiente información	
<u>"O"</u>	Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de uno o más sucesos de entrada para producir el suceso de salida	
<u>"Y"</u>	Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de todos los signos de entrada para producir el proceso de salida	
<u>PUERTAS INHIBICIÓN</u>	Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia del suceso de entrada y la satisfacción de una condición de inhibición	
<u>CONDICIÓN EXTERNA</u>	Se utiliza para indicar una condición o suceso que existe como parte del escenario en que se desarrolla el árbol de fallas	
<u>TRANSFERENCIAS</u>	Se utilizan para continuar el desarrollo del árbol en otra parte (por ejemplo, en otra página, por falta de espacio).	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla II.13. Nombres, usos y símbolos de las compuertas lógicas usadas en un Árbol de fallas(28).



- ✓ Permite el análisis del efecto de los cambios o adiciones de equipo al proceso.
- ✓ Puede ser usado durante el diseño, modificación u operación de la unidad.
- ✓ Puede ser realizado por personal adiestrado de forma adecuada, sin necesidad de que tenga mucho adiestramiento.
- ✓ Las secuencias de eventos que conducen a accidentes son investigadas.
- ✓ Al no ser investigadas las secuencias de eventos sin consecuencias graves, el tiempo de realización disminuye al igual que el trabajo.
- ✓ Tiene la facultad de investigar fallas complejas.

vii. **Análisis de Consecuencias o Efectos**

Con un análisis de consecuencias se puede estimar la magnitud de los daños ocasionados por un accidente, por ejemplo, al manejar, transportar o procesar una sustancia o material peligroso, generadas por la naturaleza de sus características de toxicidad, reactividad, inflamabilidad, explosividad. Este tipo de estimaciones se realiza mediante el uso de modelos matemáticos, los cuales simplifican los mecanismos por los cuales se da un incidente, ya que estos son muy diversos y pueden ser muy complejos.

Estos modelos requieren de los siguientes datos:

- a) Propiedades físicas y químicas de las sustancias.
- b) Características del contenedor o los contenedores.
- c) Condiciones físicas o atmosféricas del lugar o sistema de estudio.

Para la selección del tipo de modelo que se utilizará, primero se debe determinar el escenario del accidente, identificándolo con alguna técnica de análisis de riesgos que sea más cualitativa. Posteriormente se determina las consecuencias y por último se cuantifican las pérdidas o daños.

Los accidentes más frecuentes que ocurren en la industria química son los incendios y las explosiones, seguido por fugas de sustancias tóxicas, por eso, la evaluación de consecuencias de incendios y explosiones, requiere de conocimiento de datos que definan el escenario en el cual ocurre.

Por lo tanto, se debe conocer las siguientes características de las sustancias con las que se involucra el accidente que se está analizando:



- Propiedades de los distintos materiales en cuanto a incendios y explosiones.
- Cuanto material dentro de los límites de inflamabilidad existe en una nube en el momento de la explosión o cuánto líquido inflamable hay en el derrame que se ha incendiado.
- Las consecuencias de un incendio o de una explosión en un escenario determinado.
- Procedimientos para reducir o mitigar el riesgo de incendio y explosión.

Esta técnica puede hacer un buen Análisis de Riesgos si es usada en combinación con las técnicas HAZOP y Análisis del Árbol de Fallas. La técnica HAZOP identifica riesgos de operabilidad, la técnica FTA los cuantifica (determina la probabilidad o la frecuencia de ocurrencia del evento culminante o potencial, el cual se identifica con la técnica HAZOP) y permite tomar decisiones, y el Análisis del Árbol de Fallas determina los efectos de un accidente potencial identificado, información que sirve de base para llevar a cabo acciones específicas para mitigarlos.

Es posible aplicar dos o más técnicas para un determinado nodo, siempre y cuando, estas nos proporcionen resultados diferentes que enriquezcan el estudio. Si se aplican dos técnicas diferentes, por su naturaleza, para un mismo nodo, no quiere decir que se está haciendo un análisis de riesgos completos. Si se aplican dos o más técnicas generalizadas, por ejemplo, HAZOP, FTA y AC (Análisis de Consecuencias), se está haciendo un estudio completo de riesgos (identificación, evaluación y cálculo de efectos).

II.F. MODELOS PARA ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

Como ya se mencionó, en la industria química los accidentes más recurrentes y los más documentados son incendios, explosiones y derrames de sustancias tóxicas a la atmósfera. Y es que, la naturaleza de las materias primas, procesos y productos terminados que se utilizan en su operación son muchas veces impredecibles cuando se modifica alguna condición que no está lo suficientemente estudiada.

Existen tres factores que son necesarios para poder generar fuego, estos se muestran en la **Figura II.5**. Para que el fuego sea generado, no debe de faltar ninguno de estos elementos. A continuación se establecen los modelos para representar accidentes donde se ve involucrado fuego y en el **Apéndice C** se presentan una serie de términos usados en el estudio de accidentes en los que se ve involucrado fuego.

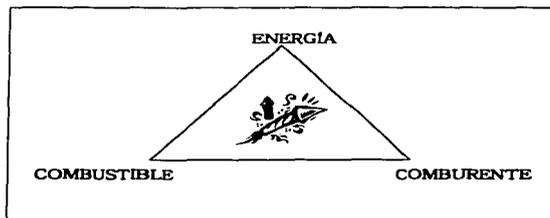


Figura II.5. Triángulo del Fuego.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.F.1. ECUACIONES DE MODELAMIENTO

i. Modelos para Límites de Inflamabilidad

● Modelo de Jones

▣ Ecuación:

$$L.S.I. = 3.55 \times C_{COMB}$$

$$L.I.I. = 0.55 \times C_{COMB}$$

donde:

C_{COMB} : la concentración estequiométrica del producto inflamable para la combustión en una mezcla con aire.

L.S.I.: es el límite superior de inflamabilidad de cada uno de los componentes de la mezcla.

L.I.I. : es el límite inferior de inflamabilidad de cada uno de los componentes de la mezcla.

● Modelo de Spakowaki:

▣ Ecuación:

$$L.I.I. \times (-\Delta H_{COMB}) = 4.354 \times 10^3$$

donde:

$(-\Delta H_{COMB})$: es el calor de combustión (superior) estándar, expresado en kJ/mol,

L.I.I.: en porcentaje de volumen.

L.I.I.: es el límite inferior de inflamabilidad de cada uno de los componentes de la mezcla.



ii. Modelos para mezclas de vapores inflamables

● **Modelo de Le Chatelier:**

▣ Ecuación:

$$L.I.I._{MEZCLA} = \frac{1}{\sum (Y_{i,comb} / L.I.I._{i_1})}$$

donde:

$Y_{i,comb}$: la fracción mol de cada uno de los componentes de la mezcla.

$L.I.I._{i_1}$: es el límite inferior de inflamabilidad de cada uno de los componentes de la mezcla.

iii. Evaluación de daños provocados por Nubes Explosivas

El modelo de evaluación de daños provocados por la explosión de una nube de gas o vapor inflamable involucra el cálculo para determinar un potencial explosivo aproximado de sustancias empleadas en la industria. Dentro de las sustancias que se contemplan en el modelo como factibles de formar nubes explosivas se tienen:

- Gases contenidos a una presión de 500 psi o más
- Gases mantenidos en estado líquido por efecto de alta presión.
- Gases mantenidos en estado líquido por efecto de baja temperatura.
- Líquidos combustibles o inflamables mantenidos a una temperatura superior a la de su punto de ebullición y que se encuentran en estado líquido por efecto de presión (se excluyen las sustancias cuya viscosidad sea mayor a 1×10^6 centipoises o que posean puntos de fusión mayores a 100°C).

Existen una serie de suposiciones inherentes al modelo que le permiten efectuar las estimaciones y predicciones de daños provocados por la explosión de la nube, destacando las siguientes:

- La fuga de material (almacenado o en el proceso) es instantánea, excluyéndose escapes paulatinos de gas a menos que se trate de fugas en tuberías de gran capacidad.



- El material fugado se vaporiza en forma instantánea formándose inmediatamente la nube; la vaporización y formación de la nube se efectúa de acuerdo con las propiedades termodinámicas del gas o líquido antes de producirse la fuga.
- Se asume una nube de forma cilíndrica cuya altura corresponde a su eje vertical. Se supone que la nube cilíndrica no es distorsionada por el viento ni por estructuras o edificios cercanos.
- La composición de la nube es uniforme y su concentración corresponde a la media aritmética de los límites superior e inferior de explosividad del material.
- El valor del calor de combustión del material se transforma a un equivalente en peso de trinitrotolueno (TNT); el cual tiene un valor de 1 830 Btu /lb.
- La temperatura del aire ambiente se considera constante e igual a 21.1°C (70 °F).
- Se considera que una nube originada en el interior de un edificio, formará una nube de las mismas dimensiones que una originada en el exterior del mismo.

Una vez que se produce la explosión, se generan una serie de ondas expansivas circulares, de tal forma que las ondas de mayor presión están situadas formando una circunferencia cercana al centro de la nube y las de menor presión se sitúan en circunferencias de diámetros mayores. El objetivo del modelo es entonces determinar la magnitud de los diámetros asociados a la sobrepresión de las ondas y los daños producidos en instalaciones. La metodología de funcionamiento del modelo involucra varios pasos:

1. Cálculo del peso de material en el sistema.
2. Cálculo del peso de material en la nube.
3. Cálculo del diámetro de la nube formada.
4. Cálculo de la energía desprendida por la explosión.
5. Determinación del diámetro de las ondas expansivas.
6. Determinación de los daños ocasionados.

Cálculo del peso de material en el sistema. (W_g o W_l)

Si el material en el proceso es un gas mantenido a 500 psi de presión o más, el peso de material se estima a partir de la ley de los gases:

$$W_g = \frac{P}{RT} MV_g \quad (1)$$



donde:

W_g = Peso del gas en el proceso (lb)

V_g = Volumen del gas en el proceso (ft^3) a condiciones normales (0°C y 1 atm)

Se deberá tomar en cuenta su factor de compresibilidad

M = Peso molecular del gas (lb/lb mol)

R = Constante de los gases ($1.314 \text{ atm ft}^3/\text{lb mol } ^\circ\text{K}$)

P = Presión (atm)

T = Temperatura ($^\circ\text{K}$)

Si el material en el proceso se encuentra en estado líquido, el peso de material se calcula con su volumen y densidad:

donde:

$$W_l = 8.34R_o V_l \quad (2)$$

W_l = Peso del líquido en el proceso (lb)

R_o = Densidad del líquido en el proceso (g/ml) a temperatura del proceso (T_p)

V_l = Volumen del líquido en el proceso (gal)

Cálculo del peso de material en la nube.

El peso de material en la nube se estima de acuerdo a las características del material en el proceso:

- Para un gas mantenido a 500 psi o más de presión, el peso de material en la nube se asume igual al peso de material en el proceso:

$$W = W_g \quad (3)$$

donde W está dado en libras.

- Para los gases licuados por efecto de presión o temperatura, al producirse la fuga se considera que todo el material pasa a la fase gaseosa:

$$W = W_g \quad (4)$$



- Para líquidos con un punto de ebullición inferior o igual a la temperatura ambiente (considerada de 21.1 °C) se asume que se produce una vaporización total del 100% del material en el proceso, de donde:

$$W = W_v \quad (5)$$

- Si el líquido posee un punto de ebullición superior a 21.1 °C, la cantidad vaporizada se calcula con:

$$W = W_v \frac{C_p(T_p - T_{eb})}{\dot{U}h_v} \quad (6)$$

donde:

T_p = temperatura del líquido en el proceso (°C)

T_{eb} = temperatura de ebullición del líquido (°C)

C_p = media geométrica de los calores específicos del líquido (cal/g°C) a diferentes temperaturas entre T_{eb} y T_p

$\dot{U}h_v$ = calor de vaporización del líquido (cal/g) a la temperatura de ebullición T_{eb}

Cálculo del diámetro de la nube formada.

Como se mencionó anteriormente se asume que la nube es de forma cilíndrica, cuyo diámetro se calcula con la siguiente expresión:

$$D = 22.181 \left(W + \frac{1}{hMF} \right)^{1/3} \quad (7)$$

donde:

D = Diámetro de la nube formada (ft).

h = altura de la nube formada (ft).

M = peso molecular del material.

W = peso del material en la nube.

El parámetro F corresponde a la fracción de la nube representada por gas o vapor, si la nube en su totalidad se encuentra a una concentración explosiva media. F se determina con:

$$F = \frac{L.I.E. + L.S.E.}{2 \cdot 100} \quad (8)$$

donde:



L.I.E. : es el Límite inferior de explosividad del material (%).

L.S.E.: es el Límite superior de explosividad del material (%).

Cálculo de la energía desprendida por la explosión.

Se asume que la energía desprendida por la explosión de la nube se expresa en su equivalente de toneladas de TNT.

La ecuación representativa es:

$$E_d = \frac{W \dot{U}H_c E}{4.03 \times 10^6} \quad (9)$$

donde:

E_d = energía generada expresada en peso de TNT, que produce una fuerza equivalente a la explosividad de la nube (Ton TNT).

$\dot{U}H_c$ = calor de combustión del material (Btu/lb), que para el TNT es de 4.03×10^6 Btu/Ton.

E = factor de explosividad.

W = peso de material en la nube.

El factor E es adimensional y determina la fracción del calor de combustión que sirve para producir las ondas de sobrepresión. Para muchos materiales el valor de E se encuentra dentro del rango 0.01 a 0.1. Para las nubes explosivas aquí consideradas se emplean los valores:

E = 0.02 cuando el escenario se considera de DMP (Diámetro Máximo Probable)

E = 0.10 cuando el escenario se considera de DMC (Diámetro Máximo Catastrófico)

Determinación del diámetro de las ondas expansivas.

Las ondas expansivas (o de sobrepresión) consideradas se expresan en unidades de presión y van desde 0.5 psi hasta 30 psi. La determinación de los diámetros de los círculos de sobrepresión se efectúa a través de funciones del tipo:

$$D.O.E. = z * (E_d)^{1/3} \quad (10)$$

donde:



D.O.E. = diámetro de la onda expansiva (ft)

E_d = energía desprendida por la explosión (ton TNT)

Z = distancia escalada para la sobrepresión considerada (ft/Ton). para el rango empleado en esta tesis se tiene que los valores de Z son^(20 y 21):

Z (ft/Ton.)	PRESIÓN (psig)
1291.011	0.5
8000.013	1.0
485.007	2.0

Tabla II.14. Relación de distancia escalada y Presión en una explosión⁽²⁰⁾.

Determinación de los Daños Ocasionados

A fin de determinar los daños ocasionados por la nube explosiva se emplea la información de los efectos de diversos valores de sobrepresión sobre instalaciones y equipos en refinerías, plantas químicas y personas reportados en la tabla de evaluación de daños por explosiones que se encuentra en el concepto de Explosión (**Apéndice C**). A estos daños se deben adicionar posibles incendios y explosiones subsecuentes (efecto dominó).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO TRES:
TRABAJO EN CAMPO Y RESULTADOS.





*Cuando el conocimiento crea problemas,
la ignorancia no es la solución.*

Mario Benedetti

III. REFINACIÓN DE PETRÓLEO

Es el conjunto de una serie de procesos físicos y químicos a los que se somete el petróleo crudo, la materia prima, para obtener de él, por destilación, los diversos hidrocarburos o las familias de hidrocarburos con propiedades físicas y químicas bien definidas.

Después de la separación se aplican a los derivados así obtenidos diversos procesos de conservación para obtener de ellos productos más valiosos y éstos se someten finalmente a tratamientos con ácidos, álcalis, solventes extractivos, catalíticos con hidrógeno y reactivos químicos en general, a fin de eliminar las impurezas que los hacen impropios para su empleo comercial.

El petróleo crudo está formado por varios hidrocarburos que comprenden desde gas licuado hasta el asfalto. Su separación en columnas de destilación se realiza por las diferencias de volatilidad que tienen usos y otros. El procedimiento utilizado consiste en calentar el petróleo crudo a una temperatura en que los componentes más ligeros se evaporan, para ser enseguida condensados. Esta condensación se efectúa a diferentes temperaturas. Los hidrocarburos más volátiles se condensan a menor temperatura que los menos volátiles.

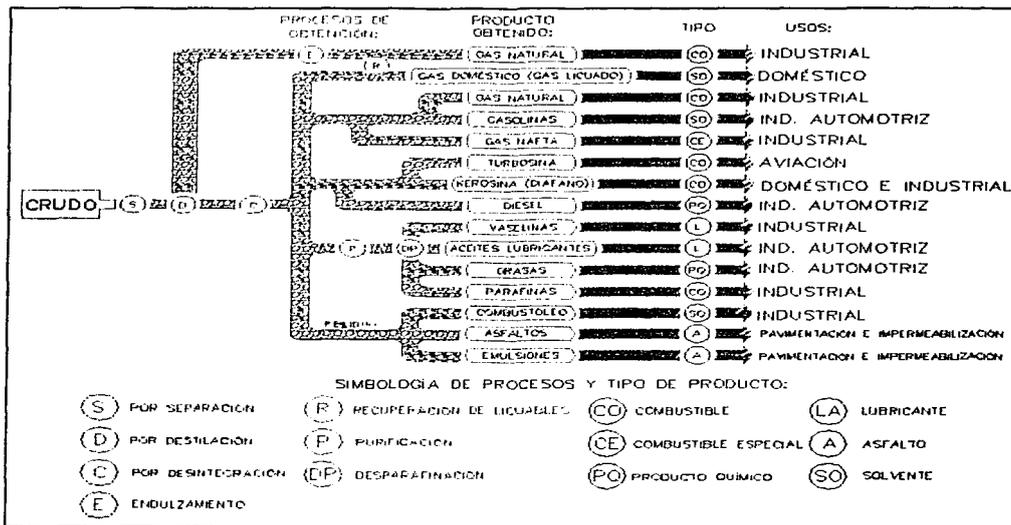
De esta manera se obtienen distintos condensados, cuyas propiedades corresponden a las del gas licuado, gasolinas, kerosinas o combustible diesel.

Procesos de desintegración

El residuo de la destilación del petróleo crudo se somete a una nueva destilación al alto vacío para separar los componentes menos volátiles, que de acuerdo con las propiedades del petróleo crudo del que se trate, serán destinados a ser desintegrados catalíticamente o a lubricantes. El residuo de la destilación al vacío es asfalto, o bien, carga para la planta de coque o para la hidrodeseintegradora de residuales y la subsecuente obtención de destilados. Los destilados al vacío que se destinan a lubricantes se someten a procesos adicionales: extracción con furfural y desparafinación con metil etil cetona. Al final se obtiene de ellos lubricantes básicos, que con diferentes aditivos, forman los lubricantes y las parafinas que existen en el mercado.



Los destilados al vacío que por sus características no se dedican a lubricantes, se desintegran catalíticamente para convertirse en productos comerciales: gas licuado, gasolinas de alto índice de octano y combustible diesel.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura III.1. Árbol de productos básicos del petróleo crudo.

III.A. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: LA PLANTA DESPARAFINADORA

La meta de esta planta es obtener la separación de los hidrocarburos parafínicos de las fracciones lubricantes en el aceite refinado procedente de la planta de tratamiento con furfural. La planta desparafinadora tiene una gran importancia ya que proporciona los aceites básicos para formular los diversos tipos de lubricantes. En México, solo existe un solo sector de lubricantes, el cual está ubicado dentro de la Refinería: "Ingeniero Antonio M. Amor", en Salamanca, Guanajuato.

La separación de los aceites básicos o fracciones lubricantes de las parafinas, se efectúa por medio de un solvente selectivo. Aquí se aplica el término de "selectividad" a la afinidad que tiene una sustancia por otra a una concentración y temperatura dada. En



el caso de la desparafinación, la metil etil cetona, es un solvente selectivo, el cual disolverá a ciertas clases de hidrocarburos contenidos en la carga de aceites lubricantes y rechazará a otros. La mayoría de las parafinas son completamente insolubles en esta cetona a las temperaturas del proceso de filtración, por eso, además, para asegurar que no se formen dos fases líquidas, se agrega un solvente del aceite que es el tolueno. Para retener el excelente efecto anti-solvente de la metil etil cetona para la parafina y obtener una cristalización de la misma en una forma fácil de filtrar, se le añade a la cetona Tolueno, el cual tiene un alto poder solvente para el aceite y cuando se mezcla con la cetona no disuelve a la parafina a la temperatura del proceso de filtración. Es decir, se separan aceites e hidrocarburos de la parafina.

DESCRIPCIÓN DEL FLUJO DE LA PLANTA DESPARAFINADORA

La unidad desparafinadora es dividida en secciones, que, siguiendo el orden del flujo son:

- i. Recepción y mezcla de solventes.
- ii. Sección de enfriamiento de la carga de aceite.
- iii. Filtros continuos deparafinadores.
- iv. Sección de enfriamiento de la carga de aceite.
- v. Sección de enfriamiento de la mezcla de parafina primaria.
- vi. Filtración fraccionada de parafina.
- vii. Filtración de repaso.
- viii. Enfriamiento de solvente con propano.
- ix. Sistema de recuperación de productos y solvente para:
 - a) Aceite desparafinado.
 - b) Parafina producto (o parafina dura).
 - c) Parafina aceitosa (o parafina suave).
- x. Generación de gas inerte, circulación y enfriamiento.
- xi. Flujo de propano refrigerante.

i. Recepción y Mezcla de Solventes.

Como ya se menciono antes, los solventes que se utilizan en esta planta son metil etil cetona y tolueno, los cuales son recibidos en carros tanque y auto tanques y son



descargados en los acumuladores, los cuales están equipados con indicadores de nivel y comunicados con una línea de balance.

ii. Sección de enfriamiento de la carga de aceite

La carga de aceite parafinoso es un aceite que previamente se ha refinado con furfural, dicha carga se bombea de los tanques de almacenamiento por medio de las bombas de carga P-301 y P-301-A. La velocidad de flujo se regula por medio del controlador de flujo FRC-301. La relación que existe en este punto entre el solvente y la carga, ocasionado por baja si la densidad del aceite es reducida.

Después de salir del calentador de carga, la mezcla de carga y de solvente se divide en tres corrientes paralelas por medio de tres controladores de flujo. Cada corriente pasa a través de tres preenfriadores de doble tubo, y de dos enfriadores de doble tubo, colocados en serie. Los tres controladores de flujo de las corrientes paralelas FRC-304 A, B y C son automáticamente accionados por el controlador de flujo de la carga parafinosa FRC-301 de tal manera que cualquier cambio de flujo o variación de la carga parafinosa será transmitido y absorbido igualmente por las tres corrientes paralelas correspondientes a cada uno de los bancos de carga. A medida que la mezcla de carga y solvente pasa por los preenfriadores de tubos concéntricos, los cuales cuentan con raspadores, es enfriada contra aceite filtrado frío que proviene de la sección de filtración y que va hacia la sección de recuperación. El intercambio de calor se lleva a cabo a contra corriente para aprovechar al máximo la baja temperatura del aceite ya filtrado. La operación final es llevada a cabo en los enfriadores de tubos concéntricos, donde la mezcla es llevada a la temperatura de filtración por medio de evaporación de propano líquido que viaja por los tubos exteriores.

Las tres corrientes paralelas se unan después de salir de los últimos enfriadores con propano, ya con la temperatura de filtración requerida y entra al acumulador de alimentación de los filtros deparafinadores D-315.

Es esencial controlar la temperatura de salida de los enfriadores con propano, de tal forma que si hay un enfriamiento insuficiente para dar la temperatura deseada, el punto de control de temperatura en la salida de la solución de filtrado reduce para proporcionar un intercambio adecuado y contar con los requisitos de enfriamiento.



Dilución Incremental

Al desparafinar los neutros de baja viscosidad se pueden obtener cristales de parafina que, contienen un bajo porcentaje de aceite si el aceite de carga se mezcla con una cantidad mínima de solvente durante la operación de filtrado. Cuando se realiza esta operación, la proporción inicial de solvente se mantiene a un mínimo (de 0.3 a 1, o más bajo). Se agrega solvente adicional en pequeñas cantidades (incrementales) durante la operación de enfriamiento.

Es importante que la temperatura de solvente adicional sea muy aproximada a la temperatura de la carga en el punto de inyección. Para resolver este problema, el enfriamiento de aceite se realiza en etapas, haciendo posible de esta forma la adición del solvente a los siguientes niveles de temperatura:

- a) Solvente a 90 °F (32 °C)
- b) Solvente a 60 – 70 °F (15.6 – 21 °C)
- c) Solvente a 30 – 40 °F (1.1 – 4.4 °C)
- d) Solvente a 20 °F (- 6.6 °C)
- e) Solvente a 10 °F (-2.2 °C)

Se puede añadir también filtrado "A" frío en la etapa final de enfriamiento o después de haberse completado el enfriamiento para provocar la dispersión de sólidos requerida para una filtración más eficiente.

iii. Filtros de desparafinación continúa

La sección de filtrado consta de doce filtros rotatorios continuos al vacío. Cada uno cuenta con una superficie de filtración de 500 ft², con la excepción de dos que cuentan con 700 ft² (Marca AIMCO). Todos los filtros pueden usarse para una sola desparafinación pero normalmente se realiza la fraccionación de la parafina primaria y una filtración de repaso, en cuyo caso, la operación de filtros se dividirá, dependiendo de la producción y propiedades filtrantes de las respectivas cargas en:

1. Filtración para desparafinar.
2. Filtración para fraccionar la parafina primaria.
3. Filtración de repaso para la parafina dura.



La carga, más el solvente final adicionado o el filtrado frío que da una relación de líquidos y sólidos de 4 a 1 aproximadamente, sale de los preenfriadores y enfriadores y entra a un acumulador que alimenta a filtros (D-315), que se localiza en la parte superior de la sección de filtros, de tal forma que aquellos son alimentados por gravedad. El flujo de los filtros se regula por medio de un controlador de nivel.

Filtro rotatorio al vacío

Consiste de un tambor rotatorio, montado sobre una cuba la cual esta provista de una cubierta hermética equipada con mirillas de observación que permiten una visión completa del tambor rotatorio y de la operación de desprendimiento de la torta. Un tornillo sin fin, operado por un motor desaloja continuamente la torta de parafina de la descarga del raspador y lo envía a una tolva que alimenta a la succión de la bomba de mezcla de parafina y de solvente. La flecha del tambor rotatorio es accionada por un mecanismo de velocidad variable.

A medida que la carga entra al filtro, el control de nivel mantiene el tambor rotatorio sumergido un 50%. Conforme se aplica vacío internamente, el filtrado pasa a través de la lona al interior del tambor que descarga en el acumulador de filtrado D-311, conforme el filtro va girando, la torta de parafina permanece en la lona y esta se lava continuamente con solvente, para eliminar el aceite de la parafina. El filtrado que resulta del lavado de la parte inferior del filtro, hasta el punto donde se separa la torta, se descarga a través de la succión superior a vacío y entra a la succión sur del recibidor D-311. A puesto que el solvente de lavado de la torta contiene un porcentaje alto de solvente y un porcentaje bajo de aceite, generalmente se usa como diluyente adicional a la carga que va a filtros, para reponer las necesidades de solvente fresco. El flujo de aceite filtrado desparafinado se tratará posteriormente en la sección de recuperación.

La torta de parafina se desprende del interior del tambor del filtro soplándola con gas inerte a presión el cual desprende la torta antes de que sea alcanzada por la cuchilla. La cuchilla termina por desprender la parafina, descargándola a un transportador sin fin y este la envía a la succión de la bomba. Un control de nivel en la tolva o acumulador de parafina, controla el nivel en dicho acumulador regulando la admisión de vapor a la bomba. La mezcla de parafina a la salida es mantenida en condiciones de ser bombeadas mediante la adición de diluyente o recirculando una mezcla de parafina caliente, cuando se trata de los filtros de repaso. En este último caso, las velocidades



recirculación se regulan por un control de temperatura situado en la descarga de la bomba.

iv. Sección de enfriamiento de la mezcla de parafina primaria

La parafina obtenida en los filtros primarios desparafinados contiene un porcentaje alto de solvente (aproximadamente 70%), además de una cantidad de aceite, alrededor de un 10%. Para reducir la cantidad de aceite en la parafina cruda y llevarla dentro de especificación, es necesario procesarla en dos operaciones por separado: fraccionación de la parafina y otra filtración de repaso. Para fraccionar esta parafina cruda y obtener una parafina de contenido bajo y un punto de fusión alto y otra parafina aceitosa o suave que contiene aceite, es necesario calentar la parafina primaria o cruda con solvente adicional y luego enfriar la mezcla a una temperatura de filtración superior a la cual cristalizó la parafina primaria. Esta parafina se obtiene de la siguiente forma:

La parafina de cada uno de los filtros "A" que ha sido diluida con solvente o filtrado de repaso, es bombeada a un cabezal común y posteriormente entra a un cambiador (E-312), donde cambia calor con el solvente seco a 48 °F. Un TRC regula la temperatura de la parafina, variando el flujo de solvente seco a través del cambiador. En el caso de que la parafina no vuelva a fundirse, la mezcla es calentada entre los 30 y 40 °C y pasa directamente a cambiadores. En los casos en la que la parafina se vuelva a fundir, la mezcla resultante fluye a través de un cambiador de calor de baja presión (E-311). Un TRC colocado a la salida mantiene la temperatura deseada regulando el condensado que sale del calentador de vapor. La parafina fluye luego al receptor de parafina primaria (D-312), del cual es bombeado (P-314) a la sección de enfriamiento. El flujo se regula a través de FRC-317 situado en la descarga de la bomba. La parafina primaria caliente pasa a través de tres cambiadores de doble tubo o preenfriadores, donde se inicia su enfriamiento al cambiar calor con la parafina suave o filtrado "B", procedente del circuito de filtración fraccionada, de aquí fluye a través de dos enfriadores con propano colocados en serie. Un TRC colocado a la salida del enfriador regula la temperatura de filtración requerida, regulando la cantidad de propano líquido que entra al enfriador.

v. Filtración de repaso (tipo "B")

La alimentación a filtros "B" es realizada por gravedad del D-316, y su flujo es controlado para cada uno de los filtros, por medio de un control de nivel instalado en la línea de alimentación. El filtrado es extraído por medio de vacío a través de las lonas del filtro, y entra al receptor de filtrado "B" D-313 lado norte. La torta de parafina cristalizada en la



lona del filtro, es lavada con solvente para eliminarle la mayor cantidad de aceite que le sea posible. La torta es desprendida por medio de gas inerte de soplado, auxiliado por una cuchilla y es bombeado a control de nivel al acumulador D-313. El solvente para lavar la torta deberá de ser a temperatura intermedia ya que la temperatura de filtración "B" es mucho más alta que la de la filtración tipo "A", igualmente en los filtros de repaso, se usará solvente de temperatura intermedia para el lavado de la torta, dicho solvente de temperatura intermedia se tomará de los enfriadores de solvente respectivos según los requerimientos de temperatura.

vi. Filtración de repaso

La operación de filtración de repaso consiste en diluirlo con solvente y volverlo a filtrar a la misma temperatura, en estas condiciones no son necesarios calentamiento ni enfriamiento para esta operación. Esta dilución adicional a los lavados que recibe la parafina durante la filtración de repaso tiende a desalojar el exceso de aceite de la parafina para considerarla dentro de especificaciones de parafina terminada. La parafina obtenida de la filtración fraccionada es diluida con solvente de lavado intermedio, regulado por un control de flujo, esta dilución puede ser añadida en los transportadores (sinfines) o en los cambiadores de parafina primaria (filtrado tipo "C").

Las bombas de parafina de los filtros 6, 7 y 9 trasiegan la mezcla al acumulador D-313, el cual suministra carga a los filtros de repaso. Antes de entrar la parafina al tanque alimentador recibe una dilución adicional de filtrado "C" por medio de un controlador de flujo (FRC-326). En estas condiciones, la parafina diluida esta lista para filtrarse. Su alimentación a los filtros de repaso, también puede efectuarse utilizando un control de nivel ubicado en línea de carga al filtro. La torta de parafina es lavada nuevamente con solvente de temperatura intermedia, el filtrado de esta operación es colectado en el receptor de parafina tipo "C" (D-311 B lado sur). La torta de parafina desprendida del tambor, con un contenido de aproximadamente del 60% de solvente, se bombea al acumulador de parafina producto D-314 del cual se distribuye posteriormente al circuito de recuperación.

vii. Enfriamiento de solvente con propano

El solvente seco que es utilizado para lavar la torta de parafina de en los filtros y para diluciones, debe de enfriarse a las temperaturas de filtración del aceite. Esta operación se realiza en los enfriadores de solvente que se encuentran instalados en serie. El solvente



seco de la descarga del P-305, la descarga a una presión lo suficientemente alta para que sea posible la inyección de solvente de dilución en los enfriadores y los preenfriadores. El solvente seco caliente de la bomba represionada pasa a través del cambiador E-312, donde se enfría contra la parafina primaria. De este cambiador pasa a través de los cinco enfriadores en serie. Estos son del tipo de tubo y coraza; el solvente fluye a través de los tubos y al salir del último enfriador deberá de estar a la temperatura requerida. El medio de enfriamiento para los enfriadores de solvente es propano líquido por el lado de la coraza, el cual es alimentado por medio de un control de nivel. En la salida de vapores de cada enfriador están instaladas unas válvulas controladoras de temperatura, las cuales se accionan por medio de un TRC localizado a la salida de solvente seco del enfriador, la salida de los vapores de cada enfriador es alimentada a la etapa correspondiente del turbo compresor de propano. Cada enfriador de propano esta provisto de una alarma de nivel alto, del lado de la coraza, y en le caso de que el nivel este alto, la señal enviada por HLA a través de un relevador electrónico que cerrará la válvula automática de alimentación de propano líquido al enfriador y la salida de vapores al paso respectivo del turbocompresor, evitando de esta forma que el propano líquido entre al compresor.

Enfriamiento de solvente seco para diluciones incrementales

Solvente Seco: Es usado para las diluciones incrementales en la acción de enfriamiento. Debe tenerse disponible a varias temperaturas de manera que pueda ser inyectado a la temperatura de la carga que lo requiere. Los solventes a diferentes temperaturas se obtienen de cada uno de los siguientes enfriadores de solvente:

1. Salida del ER-305: Solvente de 90 °F (32 °C)
2. Salida del ER-304: Solvente de 60 °F a 70 °F (15.6 a 21°C)
3. Salida del ER-303: Solvente de 30 °F a 40 °F (1.1 a 4.4 °C)
4. Salida del ER-322 A: Solvente de 5 °F a 15 °F (-15 a -9.4 °C)
5. Salida del ER-321: Solvente de -15 a -10 °F (-26 a -12.2 °C)

Solvente húmedo: Es también es usado en diluciones incrementales, particularmente para inyectarse en el primer preenfriador. El solvente húmedo frío para estas diluciones es tomado de una corriente que lo contiene y que pasa a través del E-323 en el cual cambia calor contra parafina suave fría.



Solvente de lavado intermedio: Puesto que el fraccionamiento de la parafina primaria y la filtración de repaso se realiza a temperaturas más altas que la de la filtración primaria, se requiere de un solvente de lavado de temperatura intermedia para dichas filtraciones, éste puede ser tomado de la salida de los ER- 324, 323 o 322.

viii. Sistema de recuperación de productos

a) Recuperación de aceite desparafinado:

El filtrado primario o aceite desparafinado, una vez que cambie calor en los bancos de preenfriadores y en los E-302, pasa al acumulador de aceite filtrado D-304. Este recipiente es un tanque horizontal, donde se carga el circuito respectivo de recuperación. Como aclaración, el filtrado es sacado del D-311 A lado norte con las bombas P-312 A/B/C y el flujo es diluido en tres corrientes paralelas iguales controladas por los FRC-305 A/B/C que son accionados por un control de nivel colocado en el D-311 A norte.

Aceite producto a torre de vaporización instantánea a presión atmosférica: El aceite filtrado de D-304 es succionado por las bombas P-331 y P-331 A y descargado a través de una serie de cambiadores en los que cambia calor antes de entrar a la torre atmosférica. El tren para cambios calor es:

- 1) *Pre calentador de aceite:* Cambia calor con los vapores procedentes de la torre atmosférica (T-331): E-331.
- 2) *Calentadores de aceite producto:* cambia calor con el aceite producto que va a almacenamiento: E-332.
- 3) *Aceite producto de vaporización atmosférica:* cambia calor con los vapores calientes de la torre de alta presión (T-333): E-333.
- 4) El aceite producto fluye en paralelo a través del E-333 y E-333 A, las corrientes son controladas con dos controladores de flujo: FRC-331-A y FRC-331 B, los cuales están ajustados por el control de nivel que esta instalado en el acumulador D-304. Cuando el aceite producto entra a la torre atmosférica T-331, una gran porción de solvente es evaporado quedando permanentemente, otra porción, en los fondos de la torre.

Vaporizador de alta presión T-332

Las bombas P-332 y P-332 A succionan del fondo de la torre atmosférica T-331 y descargan al vaporizador de alta presión previo calentamiento en los calentadores de gasóleo E-334 y E-334 A. A la salida de estos cambiadores, del lado del aceite, se



encuentra instalado un TRC que controla la temperatura del aceite que va como carga a la torre de alta presión. Un control de nivel instalado en la torre atmosférica acciona el FRC-332 colocado en la línea de carga hacia la línea de alta presión con el objeto de mantener un nivel constante en el vaporizador atmosférico. Conforme el aceite va entrando en la torre de alta presión, el solvente destila por la parte superior, pasando por lo E-333 y después a los E-337 de donde regresa al acumulador para el almacenamiento de solvente seco.

Un controlador de presión, PRC-339, mantiene la presión de la torre de alta presión, regulando la salida de flujo de solvente.

Vaporizador de alta presión T-333

Los fondos de la torre de alta presión T-332, fluyen por presión diferencial al vaporizador de baja presión. El flujo es mantenido por el control de nivel instalado en la torre T-332 el cual acciona la FRCV-368 permitiendo la salida de aceite hacia la T-333. El solvente que destila por la parte superior de esta torre es conducido al acumulador de solvente seco.

Agotador de aceite T-334

Los fondos del vaporizador de baja presión fluyen hacia la parte superior del agotador de aceite. El flujo se controla por medio de un control de nivel colocado en la torre de vaporización de baja presión. En la parte inferior del agotador de aceite se inyecta vapor de arrastre con el objeto de eliminar la cantidad de solvente que haya quedado remanente en el aceite, después de haber pasado por las torres antes mencionadas.

Secador de Aceite T-335

El aceite del fondo del agotador, con un porcentaje de humedad debida al vapor de arrastre es pasado por un secador al vacío, fluyendo al mismo por presión diferencial. En dicha torre el vacío se hace por medio de un sistema de eyectores colocados en la parte superior del secador. De los fondos de la T-335 se succiona el aceite con P-333 y se envía a almacenamiento controlando el flujo con un controlador de nivel instalado en el secador. Antes de llegar a los tanques de almacenamiento, el aceite producto pasa a través del cambiador de aceite producto contra el aceite filtrado carga al vaporizador atmosférico y luego a través de un enfriador contra agua.



b) Recuperación de parafina producto:

La parafina producto de los filtros de repaso se bombea a través del calentador de parafina producto de recirculación, donde se calienta con vapor a la temperatura requerida para ser regresada al sinfín de los filtros de repaso, la temperatura generalmente se controla entre 40 y 50 °C. La parafina producto dura fluye a través del calentador de parafinas E-313, donde es calentada con vapor a una temperatura de 40 °C, controlándose la salida del condensado. La parafina dura fluye del calentador E-313 al acumulador de parafina producto D-314.

Vaporizador atmosférico de parafina dura T-351

La bomba de carga al vaporizador atmosférico de parafina dura P-375 succiona del acumulador D-314 y descarga a través de un tren de cambiadores para calor antes de entrar a la torre. El tren se integra por los siguientes cambiadores:

1. *Pre calentador de parafina dura E-351: cambia calor contra los vapores de solvente de la vaporización atmosférica.*
2. *Cambiador de parafina dura contra parafina dura caliente: que se dirige a almacenamiento E-352*
3. *Calentador de parafina dura E-353: cambia calor contra los vapores de solvente procedentes de la torre de vaporización de alta presión.*

La parafina dura caliente con solvente, entra al vaporizador atmosférico de parafina dura T-351, en donde es vaporizado la mayor parte del solvente contenido en la mezcla. El flujo es abastecido por medio de un control de nivel localizado en el acumulador de parafina dura y que reajusta a la FRCV-335, instalada en la línea de carga hacia la torre.

Torre de vaporización de alta presión T-352

La parafina dura del fondo del vaporizador atmosférico es succionada por la bomba P-352 y descarga a través del calentador E-354 o E-405 donde cambia calor contra gasóleo caliente. La temperatura de la parafina se mantiene por medio de un TRC colocado a la salida de la parafina, el cual reajusta la válvula automática del gasóleo caliente. El flujo hacia la torre de alta presión es controlado por medio de una válvula automática reguladora de flujo FRC-336, la cual es reajustada por un control de nivel instalado en la



torre de vaporización atmosférica. El solvente que destila por la parte superior de la torre de alta presión pasa a través de un enfriador de vapores (E-353) y un condensador (E-356) regresando a almacenamiento. La presión en la torre de alta presión de la parafina dura es controlada por un PRC que regula el flujo de solvente condensado E-356.

Agotador de parafina dura T-353

Los fondos del vaporizador de alta presión, conteniendo una cantidad menor de solvente, fluyen por presión diferencial al agotador de parafina dura. La cantidad de flujo al agotador se gobierna por medio del control de nivel instalado en el vaporizador de alta presión y calibrado para mantener un nivel constante en la torre. La parafina dura es agotada con vapor de arrastre que elimina las trazas de solvente. La bomba P-353 succiona del fondo del agotador y la parafina a través del E-352, en donde se enfría a la temperatura requerida. Un controlador de nivel en el agotador mantiene el nivel en el mismo controlando el vapor a la bomba P-353.

c) Recuperación de parafina suave:

En el D-311 B es recibido por la parte norte el filtrado "B" o parafina suave y en la parte sur el filtrado de repaso o filtrado "C".

Filtrado de Repaso

Contiene un porcentaje alto de solvente y una cantidad pequeña de parafina suave, razón por la que se utiliza como recirculación en el recibidor de filtrado "C". Está instalado un control de nivel que reajusta a la válvula automática, la cual repone solvente fresco al acumulador con objeto de mantener un nivel constante. Este solvente proviene del cabezal de solvente de temperatura intermedia.

El filtrado es recirculado por medio de las bombas P-316, P-316 A, P-319 y P-319 A a los siguientes puntos:

- 1) Al tambor de alimentación al filtro como recirculación de filtrado para la filtración de repaso.
- 2) A los filtros "B" como lavado.
- 3) Al sinfín de los filtros "A" como diluyente de la parafina primaria
- 4) Al cabezal de parafina también como diluyente (banco D)



Filtrado "B" o parafina suave

El filtrado "B" contiene parafina suave y un porcentaje de aceite bajo, eliminado de la parafina primaria, se colecta D-311 B lado norte, de este acumulador es succionado por la P-315 y la descarga es distribuida de la siguiente manera:

- 1) Una corriente se recircula a control de flujo como dilución a la parafina primaria antes de entrar al enfriador final del banco "D" o puede ser inyectada como filtrado de recirculación al enfriador D-2.
- 2) A través del cambiador de parafina primaria (preenfriadores) en los tubos y exteriores como medio de enfriamiento de parafina primaria.
- 3) De la salida de los preenfriadores la parafina suave fría pasa a través del cambiador E-323, donde cambia calor contra solvente húmedo.
- 4) De la salida de los preenfriadores la parafina suave fría pasa a través del cambiador E-323 en donde cambia calor contra solvente húmedo, la temperatura de salida del solvente, es controlada por medio de un TRC:
- 5) La parafina suave entra al tanque de almacenamiento D-305 del cual se bombea al circuito de recuperación respectivo.

Torre de vaporización atmosférica de parafina suave

La bomba P-341 succiona del acumulador D-305 descargando al tren de cambiadores siguientes antes de entrar a la torre de vaporización atmosférica:

- 1) A través de precalentador de parafina suave en donde cambia calor contra los vapores de la torre atmosférica de parafina suave, E-341.
- 2) A través del cambiador de parafina suave de carga al circuito contra la parafina suave que va a los tanques de almacenamiento, E-342.
- 3) El flujo se divide en dos corrientes paralelas que pasan a través de los cambiadores donde absorbe calor de los vapores del domo de la torre de vaporización de alta presión.

Un control de flujo en cada una de las corrientes, regula en cada una de ellas para igualar los flujos a cada uno de los cambiadores, dichos controles son actuados por medio del control de nivel situado en el acumulador, manteniendo un nivel constante en éste. La



parafina suave caliente entra al vaporizador atmosférico en donde una gran parte del solvente es evaporada y regresada al almacenamiento de solvente húmedo.

Torre de vaporización de alta presión de parafina suave

La bomba P-342 succiona del fondo del vaporizador atmosférico y descarga al vaporizador de alta presión, pasando la carga a través del cambiador con gasóleo caliente E-344, antes de entrar a la torre de alta. La temperatura de la parafina suave es controlada por medio de un TRC ubicado en la salida de parafina del E-344, que regula el flujo de gasóleo. El flujo de parafina suave a la torre de alta presión se manipula por medio de un FRC ubicado antes del vaporizador que es reajustado por el control de nivel instalado en el fondo de la torre de vaporización atmosférica. En la torre de alta presión se elimina casi en totalidad el solvente, la salida de vapores de solvente de en dicha torre es controlada por medio de un control de presión de trabajo de dicha torre calibrada a 30 libras aproximadamente, el cual puede variar y regular el flujo de solvente después del condensador.

Agotador de parafina suave

Los fondos del vaporizador de alta presión fluyen por presión diferencial a la parte superior del agotador de parafina suave. La cantidad de flujo se regula por medio de un control de nivel localizado en el vaporizador de alta presión. El vapor de arrastre es inyectado por el fondo, arrastrando las trazas de solvente de la parafina suave descendente. La P-343 succiona del agotador de parafina suave y bombea la parafina caliente a través del cambiador E-342 y de aquí pasa al tanque de almacenamiento de parafina suave.

Recuperación de Solvente

El solvente recuperado de los tres circuitos regresa a almacenamiento de solvente para volverse a inyectar a la unidad. La mayor parte del solvente recuperado regresa al acumulador de solvente seco. El solvente húmedo procedente de los circuitos de parafina dura y parafina suave (torres atmosféricas) se desvía al acumulador de solvente húmedo, ya que cualquier cantidad de agua presente en la carga se congela durante el enfriamiento y se elimina junto con la torta de parafina en la filtración primaria.



De las siguientes corrientes de solvente recuperado a los circuitos se indica hacia donde son enviados para convenir a una mejor operación del sistema de recuperación del circuito de aceite producto:

- 1) Vapores del vaporizador atmosférico al acumulador de solvente seco.
- 2) Vapores del vaporizador de alta presión al acumulador de solvente seco.
- 3) Vapores del vaporizador de baja presión al acumulador de solvente seco.

Sistema de recuperación del circuito de parafina suave.

- 1) Vapores de vaporizador atmosférico pueden desviarse al acumulador de solvente seco o húmedo.
- 2) Vapores del vaporizador de alta presión al acumulador de solvente seco.

Sistema de Recuperación del circuito de parafina dura:

- 1) Vapores del vaporizador atmosférico al acumulador de solvente húmedo o al acumulador de solvente seco.
- 2) Vapores de vaporizador de alta presión al acumulador de solvente seco.

Sistema MEC – Agua

Como en el caso de furfural, la metil etil cetona con el agua forma una mezcla azeotrópica de punto de ebullición atmosférico, lo cual complica la separación completa entre las dos. Se ha instalado una torre fraccionadora para verificar dicha separación en forma efectiva, esta torre trata a la mezcla que se forma durante la operación.

La fuente principal de agua en el sistema son los tres agotadores que se unen en un cabezal común y pasan al acumulador de solvente recuperado, D-317 poniente. En este acumulador ocurre una separación de fases, procediéndose a separar una fase de agua y una de solvente. La capa de agua contiene metil etil cetona diluida y sirve como carga a la fraccionadora T-361. La capa de solvente que pudiera llevar algo de aceite disuelto, parafina y algo de humedad, derrama del lado oriente del D-317 y de allí se bombea al acumulador de solvente húmedo o al acumulador de parafina suave o de parafina primaria, según las necesidades.

La mezcla de metil etil cetona y agua también se pueden acumular en los siguientes recipientes:

- 1) Acumulador de parafina primaria: D-312.



- 2) Acumulador de parafina suave: D-305.
- 3) Acumulador de parafina dura: D-314.

El agua de estos acumuladores por regla general se purga a las copas de drenaje, las cuales descargan al resumidero D-372, de allí es succionada por la bomba P-371 y se envía al lado poniente del D-317, de donde se succiona por las bombas de carga a la fraccionadora, PS-361.

En el fondo de la torre fraccionadora se inyecta vapor agotado a través de un controlador de flujo, reajustado por un TRC localizado en la torre, la carga es alimentada por la parte superior, también a control de flujo. La metil etil cetona se elimina en la salida de vapores, como parte de una mezcla azeotrópica, después de condensarse en el E-361, se envía al D-317 lado oriente, en donde ocurre la separación de dos capas, la de solvente que derrama la lado oriente del D-317 y la del agua que vuelve a admitirse en la fraccionadora. La fraccionadora está provista de un control de nivel el cual va ajustando a la automática del fondo para mantener determinado nivel dentro de la torre (salida de agua).

ix) Sistema de Generación, circulación y enfriamiento de gas inerte

Generación de gas inerte

Para prevenir la formación de mezclas explosivas en el interior del equipo, se usa gas inerte para mantener una atmósfera adecuada se recibe de las fraccionadoras de hidrocarburos Unidades No. 6 y 9 y se distribuye de la siguiente forma:

- 1) Gas para los tanques de almacenamiento de solvente y tanques de productos intermedios.
- 2) Gas para el acumulador de gasóleo y tanque de desfogue, al resumidero D-372, a la trampa de sellos D-376, D-379, D-311 C, etc.
- 3) Gas para los preenfriadores de carga parafinosa (actualmente fuera de uso).
- 4) Gas para el tanque H-1, del cual se distribuye hacia el soplador de gas inerte, filtros etc. (líneas de balance).

Circulación de gas inerte

Gas inerte frío

El compresor centrífugo de gas inerte succiona de la trampa de gas inerte que está unida al D-311 A o receptor de filtrado "A" en esta forma se mantiene un vacío de los filtros



"A", a través de las tres válvulas de succión de cada filtro. La succión del turbo soplador se controla recirculando el vapor al mismo, dentro del rango de estabilidad de la máquina, a través de un control de presión que actúa sobre el gobernador de velocidad. Un control de presión en la salida del enfriador de gas inerte, mantiene la presión en el gas inerte destinado para soplado de los filtros. En caso de que el control de presión de la succión produzca más que la necesaria en este punto por un exceso de gas, la válvula de control PCV-306 B descargará este exceso de gas al acumulador de gas inerte H-1, de otra manera, cuando la presión del gas inerte para filtros es insuficiente, como resultado de una insuficiencia en la recuperación de gas inerte con respecto a la cantidad necesaria para la operación del compresor, se produce un aumento en la velocidad lo cual se traduce en un aumento en la presión de descarga, por medio de la válvula PCV-306 A que introduce gas inerte a la succión del compresor.

El compresor de gas inerte descarga el gas caliente a una presión de 5 libras por pulgada cuadrada (300 gr/cm^2), éste pasa a través de un preenfriador de gas inerte (contra agua) y luego a un enfriador de gas inerte, tiene lugar una condensación de agua solvente. El enfriamiento en el enfriador de gas inerte se controla por medio de un control de presión instalado en la "chimenea" el cual reajusta a la automática PCV-304 colocada en la línea de salida de vapores de dicho enfriador.

Línea de balance para filtros

La succión de la cuba de cada filtro esta unida a una línea llamada de balance, que regresa al GH-1 y esta balanceada a presión en el interior de cada filtro manteniéndola aproximadamente a 7" de agua (esta es la presión del acumulador de gas inerte H-1). El gas inerte frío de la línea de 3" pasa a la línea de balance antes de la salida a los filtros "A", para mantener una temperatura baja en los filtros, sin embargo es posible alimentar gas inerte de temperatura intermedia de suministros a los filtros "B" y a los filtros de reposo, los cuales trabajan a una temperatura más alta que la de los filtros "A". Esta diferencia de temperatura es mantenida por medio de dos controladores de temperatura que gobiernan el flujo de gas inerte frío o intermedio en las secciones de la línea de balance.

Línea de balance para los recipientes

Otra línea de balance de gas inerte va del GH-1 a los siguientes recipientes: D-321, D-305, D-303, D-306, D-301 A/B/C y D-304.



Flujo de refrigerante

El refrigerante usado por la unidad es propano líquido, se recibe en carros tanque y es descargado por medio de una bomba al acumulador D-321, de este acumulador fluye al D-322 o economizador, la salida de vapores de propano de este recipiente alimenta al 6° paso del turbocompresor de propano. Aquí se mantiene un nivel constante de propano por medio de un control de nivel que regula el flujo de propano al D-322, este acumulador está equipado con una alarma por alto nivel que envía una señal a un relevador y éste cierra el aire a la válvula de candado para evitar que pase propano líquido al 6° paso.

Propano a los enfriadores de solvente

El propano líquido del economizador fluye a través de los enfriadores de solvente en serie desde el ER-325 al ER-321, el flujo se mantiene por la presión diferencial. Cada enfriador de solvente tiene un controlador de nivel para la alimentación de propano líquido a la salida de vapores de propano de cada enfriador va a un paso diferente del compresor de propano. Todos los enfriadores tienen alarma para alto nivel y operan en la misma forma que en el economizador.

Propano a los enfriadores de parafina primaria

La alimentación de propano líquido a dichos enfriadores se puede hacer en tres partes diferentes:

- 1) Corriente de propano líquido del ER-325.
- 2) Corriente de propano líquido del ER-323.
- 3) Corriente de propano líquido del ER-322.

La selección del punto de alimentación dependerá del enfriamiento que se necesite. Cada enfriador de parafina tiene instalado un control de nivel, el cual mantiene un determinado nivel en el acumulador regulando la entrada de propano líquido por medio de la válvula automática. Los vapores de propano de ambos enfriadores regresan a la trampa intermedia.

Propano a los enfriadores de carga de gas inerte

El propano líquido necesario para los seis enfriadores de aceite y para los enfriadores de gas inerte se toma la corriente de propano líquido del enfriador de solvente ER-322. Los



vapores de estos equipos regresan a la trampa de baja presión y de allí a la succión del 1er. paso del compresor de propano.

Compresor de propano

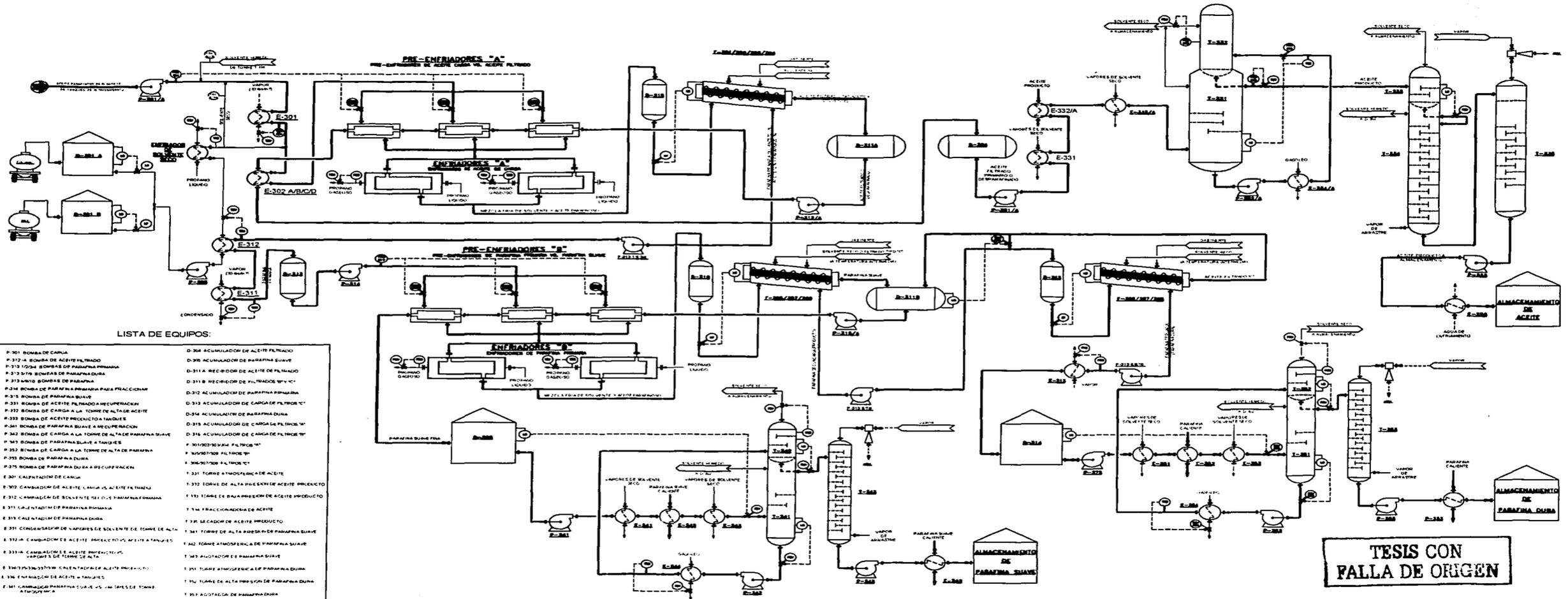
El compresor de propano es una unidad centrífuga impulsada por una turbina. Tiene seis pasos de succión, los diferentes pasos reciben vapores de propano a diferentes temperaturas y presiones, para mantener estabilidad en la operación del mismo se instaló un controlador de flujo en línea de succión de todos los pasos, excepto en la primera etapa. Estos controladores de flujo operan en el flujo mínimo de vapores a la máquina del acumulador de propano. La primera etapa esta controlada por dos controles de presión, uno de ellos regula la velocidad del compresor, controlando el vapor a la turbina y el otro mantiene una condición estable a velocidad mínima y baja presión de succión abriendo una válvula de control de presión que admite el cual se condensa en los E-321 A/B/C/D y regresa al acumulador.

III.B. ANÁLISIS DE RIESGOS

i. Metodología empleada.

La metodología que se utilizó para realizar el análisis de riesgos a la planta desparafinadora fue la siguiente:

- Formación del equipo multidisciplinario, así como la asignación de hora y sede de las sesiones HAZOP.
- Actualización de y verificación en la planta de los DMF's y DTI's.
- La revisión histórica de accidentes o incidentes.
- Selección y delimitación de circuitos dentro del circuito que se ha seleccionado para el estudio HAZOP.



LISTA DE EQUIPOS:

- P-301 BOMBA DE CARBA
- P-312-A BOMBA DE ACEITE FILTRADO
- P-313 1/2-3/4 BOMBAS DE PARAFINA PRIMARIA
- P-313-3/4 BOMBAS DE PARAFINA DURA
- P-313-3/4 BOMBAS DE PARAFINA SUAVE
- P-314 BOMBA DE PARAFINA PRIMARIA PARA FRACCIONAR
- P-315 BOMBA DE PARAFINA SUAVE
- P-321 BOMBA DE ACEITE FILTRADO RECUPERACION
- P-322 BOMBA DE CARGA A LA TORRE DE ALTA DE ACEITE
- P-333 BOMBA DE ACEITE PRECENDIDA TANQUES
- P-341 BOMBA DE PARAFINA SUAVE RECUPERACION
- P-342 BOMBA DE CARGA A LA TORRE DE ALTA DE PARAFINA SUAVE
- P-343 BOMBA DE PARAFINA SUAVE A TANQUES
- P-352 BOMBA DE CARGA A LA TORRE DE ALTA DE PARAFINA
- P-353 BOMBA DE PARAFINA DURA
- P-376 BOMBA DE PARAFINA DURA RECUPERACION
- E-301 CALENTADOR DE CARGA
- E-302 CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO ACEITE FILTRADO
- E-312 CAMBIADOR DE SOLVENTE DESDE LA PARAFINA PRIMARIA
- E-311 CALENTADOR DE PARAFINA PRIMARIA
- E-314 CALENTADOR DE PARAFINA DURA
- E-315 CALENTADOR DE VAPORES DE ACEITE PRECENDIDO
- E-322-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-323-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-324-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-325-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-326-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-327-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-328-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-329-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-330-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-331-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-332-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-333-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-334-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-335-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-336-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-337-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-338-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-339-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-340-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-341-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-342-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-343-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-344-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-345-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-346-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-347-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-348-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-349-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-350-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-351-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-352-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-353-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-354-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-355-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-356-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-357-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-358-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-359-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-360-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-361-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-362-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-363-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-364-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-365-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-366-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-367-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-368-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-369-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-370-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-371-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-372-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-373-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-374-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-375-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-376-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-377-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-378-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-379-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-380-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-381-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-382-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-383-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-384-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-385-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-386-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-387-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-388-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-389-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-390-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-391-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-392-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-393-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-394-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-395-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-396-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-397-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-398-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-399-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES
- E-400-A CAMBIADOR DE ACEITE PRECENDIDO VS. ACEITE A TANQUES

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Facultad de Químico (FQ)

TITULO DEL DIBUJO: DIAGRAMA MECÁNICO DE FLUJO PLANTA DESPARAFINADORA

Dibujado por: R-001



Aplicar el estudio HAZOP a cada circuito seleccionado.

- Elaboración del análisis de árbol de fallas (FTA) para los escenarios catastróficos detectados en el análisis HAZOP.
- Elaboración del análisis de consecuencias.

En la planta desparafinadora se seleccionaron dos circuitos de flujo para el análisis HAZOP, los cuales fueron seleccionados basándose en el registro de incidentes que se tiene en la planta y en la experiencia del personal de operación. Estos se seleccionaron por ser los que encerraban mayores riesgos. Los circuitos que se seleccionaron fueron el de propano para enfriamiento y el de solvente. En esta tesis únicamente analizaremos el primero.

ii. Descripción del circuito de enfriamiento con propano.

El refrigerante utilizado para el enfriamiento de carga parafínica es propano de 99% de pureza, recibido en carros tanque y se descarga a la unidad con la P-711, la descarga sur de esta bomba es la que corresponde a la Planta Desparafinadora. Antes de descargar se pide al laboratorio realizar una muestra de pureza (también se hace análisis cromatográfico).

Normalmente se descarga una presión de 16 a 24 kg/cm², presión más que suficiente ya que la presión del acumulador de propano D-321 es de 12 a 13 kg/cm².

Otra forma de proveer de propano es de la línea directa de la Planta FCC, a la cual de le debe solicitar que ajuste la pureza al 90% mínimo antes de recibir en planta.

Acumulador de propano D-321

Este acumulador alimenta a los enriadores de solvente de carga parafínica (ER-321, 322, 323 Y 324, plano R-11600-6) y de gas inerte. Los carros tanque que se reciben son descargados directamente a este acumulador. La línea de entrada se localiza en la parte superior de lado sur, se cuenta con una doble válvula de bloqueo, aparte de la válvula situada en la descarga de la bomba P-711; normalmente se tiene una presión de 11 a 12 kg/cm² en el acumulador, aunque en ocasiones puede subir hasta 13 o 13 1/2 kg/cm². Este aumento de presión puede ser ocasionada por una concentración alta de incondensables en el propano, para bajar la presión bastará con desfogar el tiempo y las veces necesarias para eliminar los incondensables, basándose en el análisis de laboratorio. Se ha observado que una gran cantidad muy elevada de incondensables en el propano disminuye la



eficiencia en el enfriamiento y aumenta considerablemente la presión de descarga del turbocompresor.

Enfriador de solvente

Están alimentados por el D-321. en serie, el propano fluye de un enfriador a otro por diferencia de presión. Del lado del solvente se alimenta también en serie, el solvente procedente del E-312 entra al ER-325 y de ahí pasa a los siguientes enfriadores hasta salir a la temperatura requerida para el lavado de los filtros.

Cada enfriador de solvente está dotado de una válvula automática controladora de nivel del lado del propano (coraza), la cual mantiene el nivel en el enfriador al recibir la señal de su respectivo flotador. En la línea de salida de vapores está instalada una válvula de mariposa (TRCV), cuya abertura se puede graduar manual o automáticamente, según la temperatura requerida en el solvente a la salida del enfriador sobre la cual está colocado el termopar, se cuenta además otro flotador el cual envía señal a una alarma de nivel alto, ajustado para alarmar a un determinado nivel. En caso de que el control de nivel no cierre al llegar al porcentaje de control, la alarma de nivel alto actúa a través de un dispositivo que cierra la válvula TRCV correspondiente, cortando al mismo tiempo el aire a la LCV. Este tipo de protección tiene por objeto evitar que pase propano líquido a los pasos del compresor.

Alimentación de propano a Chillers (enfriadores de doble tubo)

De la salida del economizador, se deriva una línea de alimentación a los bancos de carga, a esta línea se injertan las derivaciones del ER-324, ER-323 y ER-322. Las alimentaciones a los enfriadores Al. B1, C1, A2, B2 y C2 pueden variarse de acuerdo a las necesidades de enfriamiento y al consumo de propano y se pueden alimentar los enfriadores 1 y 2 de la misma salida, o de diferentes derivaciones.

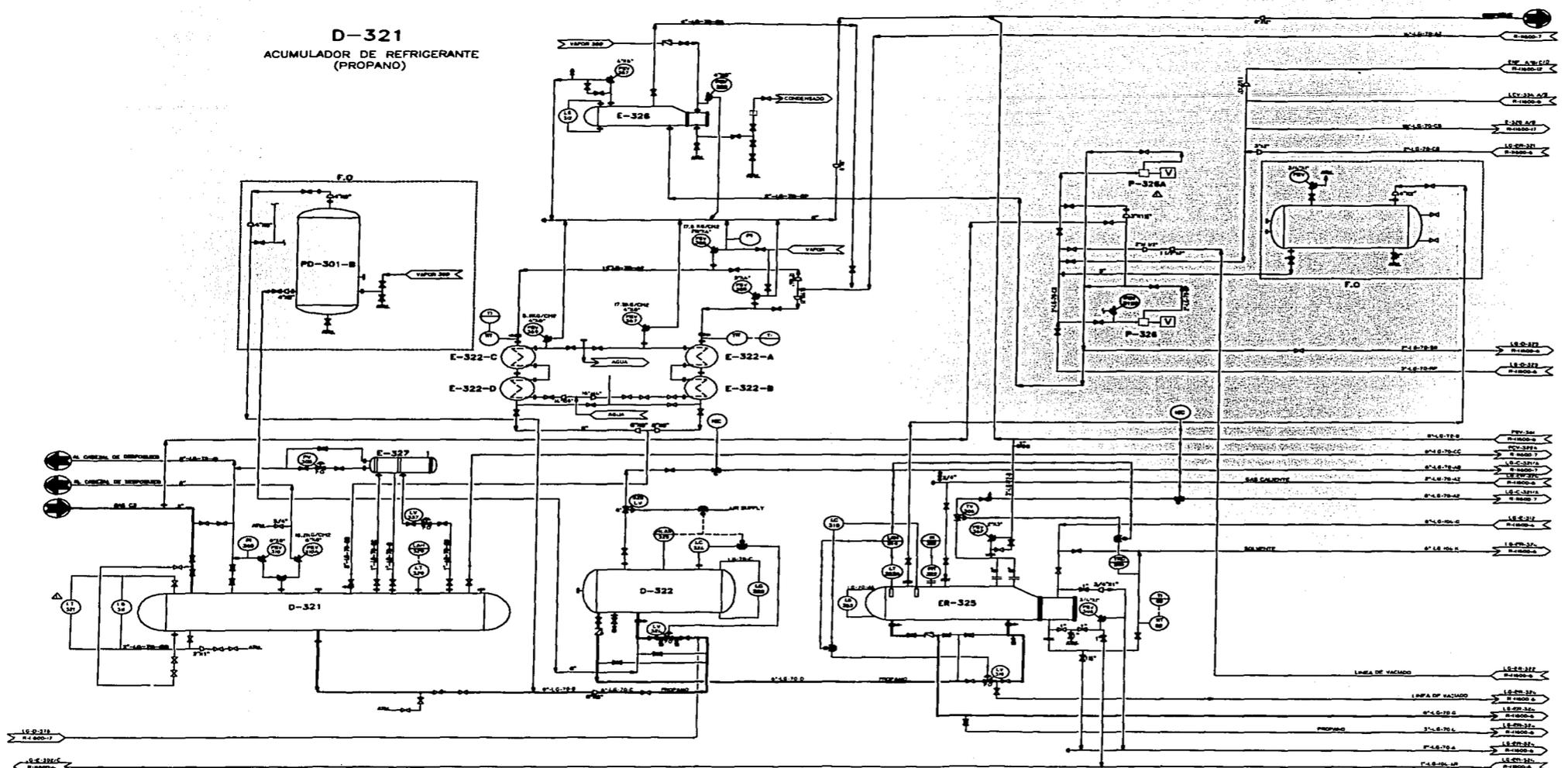
La derivación de propano que se inicia en el ER-325 y a la cual se injertan los ramales de las salidas del ER-323 y ER-322, va a alimentar al banco D o enfriadores de parafina primaria, existe además otra línea que sale del ER-322 y que alimenta a los enfriadores de gas inerte E-325 A y B. Al efectuar cualquier cambio de condiciones de operación se deberá tener conocimiento de las alimentaciones de propano a los bancos.



iii. Análisis HAZOP

En el registro de las sesiones de Análisis HAZOP se presentan los resultados del análisis: causas de las desviaciones, consecuencias de las mismas, su frecuencia y gravedad, su índice de riesgo, las protecciones con que cuenta el circuito y las recomendaciones correspondientes para mitigar o eliminar dichas desviaciones.

Los niveles de frecuencia y gravedad empleados en estas sesiones HAZOP fueron los que se mostraron en las **Tabla II.10. y II.11.** y fueron determinados por la experiencia del personal que opera la planta. Con estos niveles se puede determinar el índice de riesgo, con la ayuda de la **Figura II.3.** Con este índice se clasificaron las recomendaciones con la ayuda de la **Tabla II.12.** Es preciso garantizar un registro sistemático de los resultados del análisis HAZOP, lo que, por lo general se realiza en un formato tradicional en columnas en las cuales están enlistadas las Causas, Consecuencias, Protecciones y Recomendaciones. En las páginas siguientes se muestran los resultados obtenidos.



ER-325
ENFRIADORES DE SOLVENTE

D-322
ACUMULADOR "FLASH"
DE REFRIGERANTE

E-326
TRAMPA DE REFRIGERANTE CALIENTE

E-322-A,B,C,D
CONDENSADORES DE REFRIGERANTE

P-326/A
BOMBA DE RECIRCULACION
DE PROPANO

E-327
ENFRIADOR DE NO-CONDENSABLES

SIMBOLOGIA
CIRCUITO

CIRCUITO DE PROPANO

TESIS CON
FALLA DE CARGEN

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FO)

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO

FIGURA 14.
R-11600-5

ER-322
ENFRIADOR DE SOLVENTE

ER-324
ENFRIADOR DE SOLVENTE

ER-321
ENFRIADOR DE SOLVENTE

ER-323
ENFRIADOR DE SOLVENTE

D-323
TRAMPA DE SUCCION
DE REFRIGERANTE (PROPANO)

D-324
TRAMPA DE SUCCION
DE REFRIGERANTE DE PRESION
INTERMEDIA

SIMBOLOGIA
CIRCUITO

CIRCUITO DE PROPANO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

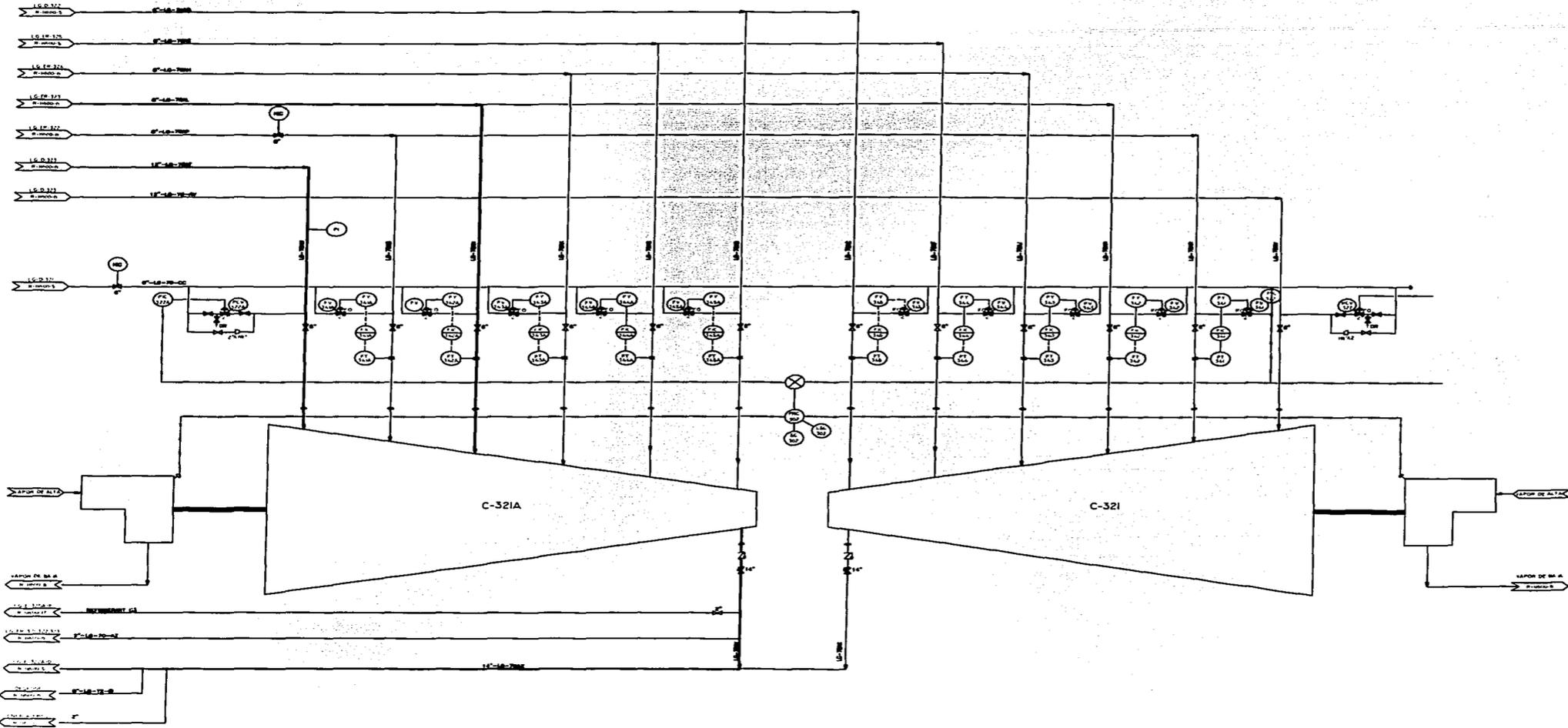
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO

R-11600-6

C-321A
COMPRESOR DE REFRIGERANTE
(PROPANO)

C-321
COMPRESOR DE REFRIGERANTE
(PROPANO)



SIMBOLOGIA
CIRCUITO

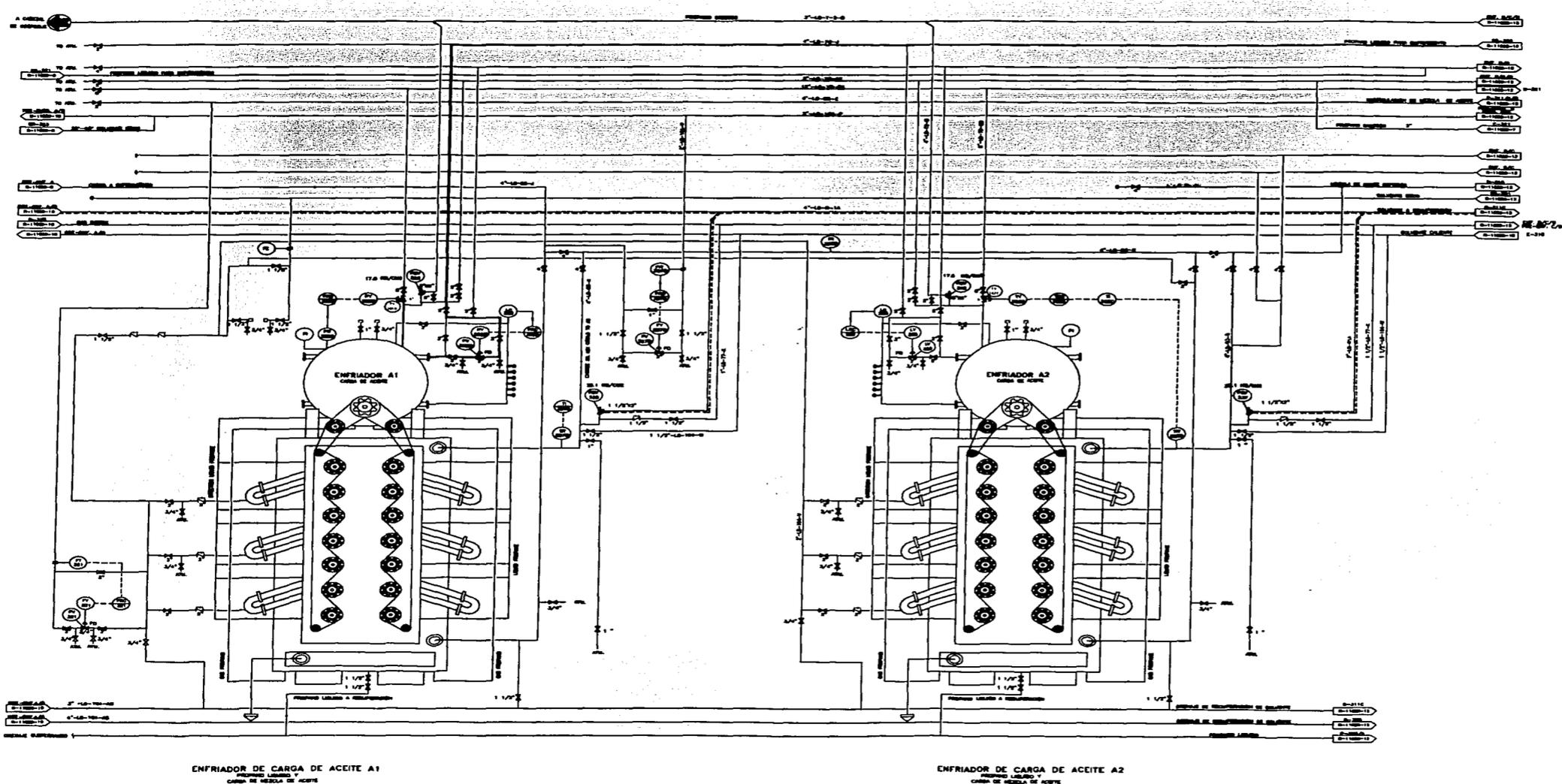
CIRCUITO DE PROPANO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
SECCIÓN DE ENFRÍAMIENTO

R-11600-7



SIMBOLOGIA
CIRCUITO

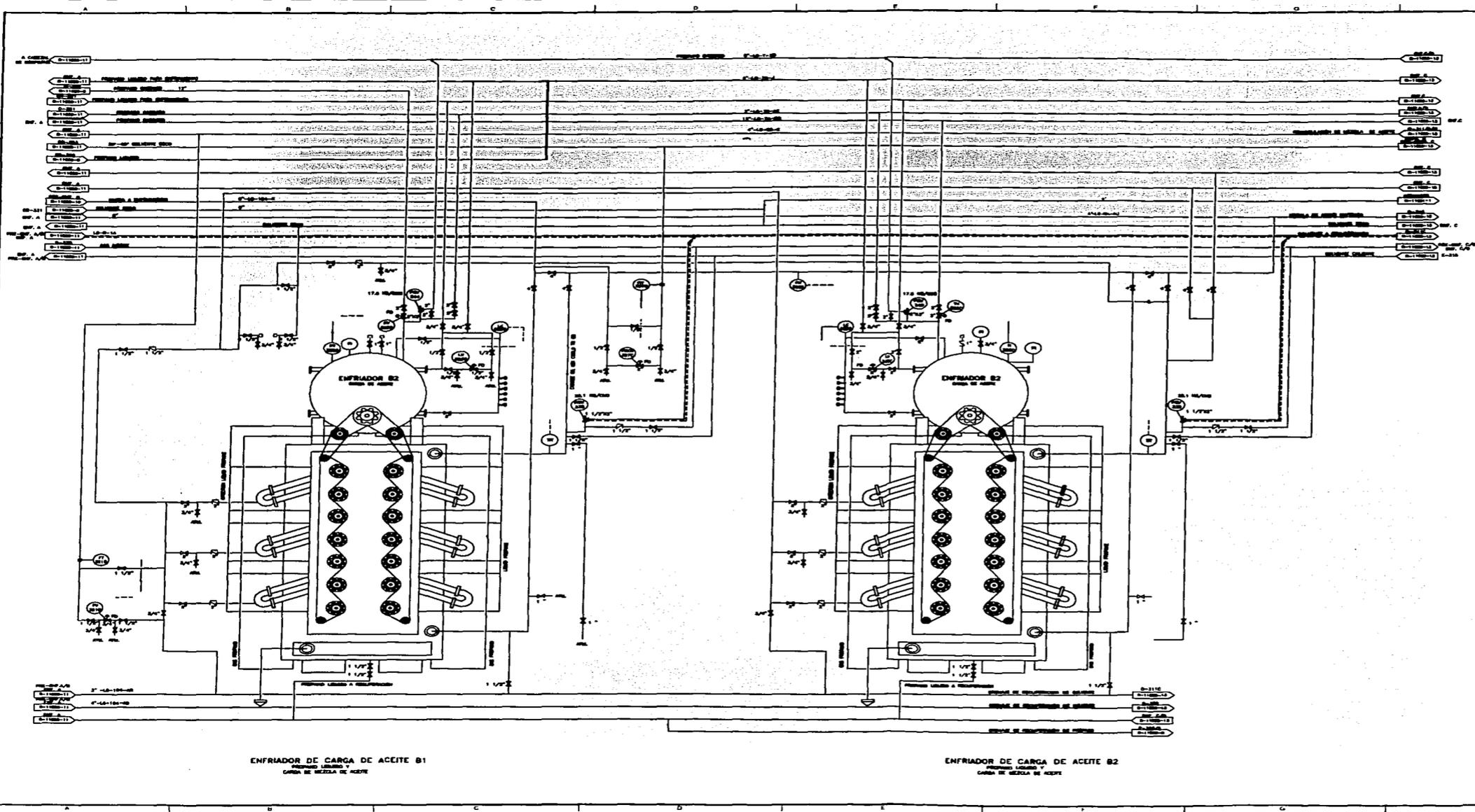
CIRCUITO DE PROPANO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO

R-11600-11



SIMBOLOGIA
CIRCUITO

CIRCUITO DE PROPANO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO

R-11600-12



HOJAS HAZOP

AREA O PROCESO:							Circuito de propano.		
NODO :							1. Tanque acumulador D-321		
1		MAS NIVEL			PROPANO		R-11600-5		
CAUSAS:		1. Descuido en la recepción.							
CONCECUENCIAS:		1. Presión de la descarga del compresor alta.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LT-321. 2. LG-311. 3. LAH-329.		1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-329, LT-321 y LG-311.	
5	2	8	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:							B		
2		MAS NIVEL			PROPANO		R-11600-5		
CAUSAS:		1. Falsa señal de nivel del LC-324 (siempre y cuando al presentarse esta falla el nivel del acumulador D-321 sea igual o mayor al 80%).							
CONCECUENCIAS:		1. cierre de la automática LV-324, impidiendo el flujo de propano al D-322. 2. No hay flujo de propano hacia los ER 's y enfriadores de carga. 3. El compresor C-321 empezara a presentar fenómeno de "surge" por falta de vapores de propano y consecuentemente la carga a filtros y el solvente frío se calentaran.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LT-321. 2. LG-311. 3. LAH-329.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el D-322.	
3	2	6	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:							B		
3		MENOS NIVEL			PROPANO		R-11600-5		
CAUSAS:		1. No hay recibo de propano con nivel mínimo de operación (menor a 20 in).							
CONCECUENCIAS:		1. Disparo del compresor por sobre-velocidad al faltarle carga.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LG-311. 2. LT-321. 3. LG-302.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el tanque D-321 y en el D-322.	
3	2	6	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:							B		

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP.



CAPÍTULO TRES: TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.



HOJAS HAZOP

AREA O PROCESO:									
Circuito de propano.									
NODO :									
1. Tanque acumulador D-321									
NUM. DE SEÑAL:		MAS NIVEL			PROPANO			R-11600-5	
1									
CAUSAS:		1. Descuido en la recepción.							
CONCECUENCIAS:		1. Presión de la descarga del compresor alta.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LT-321. 2. LG-311. 3. LAH-329.		1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-329, LT-321 y LG-311.	
5	2	8	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:									
B									
NUM. DE SEÑAL:		MAS NIVEL			PROPANO			R-11600-5	
2									
CAUSAS:		1. Falsa señal de nivel del LC-324 (siempre y cuando al presentarse esta falla el nivel del acumulador D-321 sea igual o mayor al 80%).							
CONCECUENCIAS:		1. cierre de la automática LV-324, impidiendo el flujo de propano al D-322. 2. No hay flujo de propano hacia los ER 's y enfriadores de carga. 3. El compresor C-321 empezara a presentar fenómeno de "surge" por falta de vapores de propano y consecuentemente la carga a filtros y el solvente frío se calentaran.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LT-321. 2. LG-311. 3. LAH-329.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el D-322.	
3	2	6	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:									
B									
NUM. DE SEÑAL:		MENOS NIVEL			PROPANO			R-11600-5	
3									
CAUSAS:		1. No hay recibo de propano con nivel mínimo de operación (menor a 20 in).							
CONCECUENCIAS:		1. Disparo del compresor por sobre-velocidad al faltarle carga.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LG-311. 2. LT-321. 3. LG-302.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el tanque D-321 y en el D-322.	
3	2	6	3	2	6				
RECOMENDACIÓN CLASE:									
B									

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).



HOJAS HAZOP (cont.)

AREA O PROCESO:										Circuito de propano.			
NODO :										1. Tanque acumulador D-321			
PRESENCIA DE 40% DE COMPUESTOS DISTINTOS AL PROPANO.										PROPANO Y PROPILENO		R-11600-5	
CAUSAS:			1. Al estar recibiendo propano fresco de FCC hay descontrol en esta planta y cambia la composición a un 50% de propileno en el propano recibido.										
CONCECUENCIAS:			1. Deficiente operación del compresor y por lo tanto, deficiencia en el enfriamiento.										
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:					
F	G	R	F	G	R	1. Pruebas de laboratorio. 2. Comunicación entre FCC y LG.		1. Análisis de laboratorio previos y durante el recibo de propano. 2. Mantener la comunicación estrecha con la planta FCC cuando se este recibiendo propano.					
3	2	6	3	2	6								
RECOMENDACIÓN CLASE:													
PRESENCIA DE 40% DE COMPUESTOS DISTINTOS AL PROPANO.										PROPANO Y PROPILENO		R-11600-5	
CAUSAS:			1. Recepción de propano contaminado de los tanques de almacenamiento de FCC.										
CONCECUENCIAS:			1. Deficiente operación del compresor y por lo tanto, deficiencia en el enfriamiento.										
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:					
F	G	R	F	G	R	1. Pruebas de laboratorio. 2. Comunicación entre FCC y LG.		1. Análisis de laboratorio previos y durante el recibo de propano. 2. Mantener la comunicación estrecha con la planta FCC cuando se este recibiendo propano.					
3	2	6	3	2	6								
RECOMENDACIÓN CLASE:													

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**HOJAS HAZOP (cont.)**

NÚM. DE HOJA		ÁREA O PROCESO:				CIRCUITO DE PROPANO.	
NÚM. DE NODO		NODO :				2. Tanque economizador D-322	
6		MÁS NIVEL		PROPANO		R-11600-5	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-324.					
CONCECUENCIAS:		1. Llegada de líquido al compresor provocando su disparo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
3	2	6	3	2	6	1. LAH-325. 2. LG-302. 3. LV-325.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-325, LG-302, LC-324 y LV-325.
RECOMENDACIÓN CLASE:							
7		MÁS NIVEL		PROPANO		R-11600-5	
CAUSAS:		1. La automática no responde a la señal de control.					
CONCECUENCIAS:		1. Llegada de líquido al compresor provocando su disparo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
4	2	7	3	2	2	1. LAH-325. 2. LG-302. 3. LV-325.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-325, LG-302, LC-324 y LV-325.
RECOMENDACIÓN CLASE:							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



HOJAS HAZOP (cont.)

AREA O PROCESO:		Circuito de propano.					
NODO :		2. Tanque economizador D-322.					
NUM. DE INCIDENTO:		IDENTIFICACION:		MATERIA:		CATEGORIA:	
8		MENOS NIVEL		PROPANO		R-11600-5	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-324.					
CONSECUENCIAS:		1. No hay flujo de propano hacia los ER 's. 2. El compresor C-321 empezara a "patinar" por falta de vapores de propano y consecuentemente la carga a filtros y el solvente frío se calentaran.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG-302.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LG-302, LC-324 y LV-324.
4	2	7	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE: B							
NUM. DE INCIDENTO:		IDENTIFICACION:		MATERIA:		CATEGORIA:	
9		MENOS NIVEL		PROPANO		R-11600-5	
CAUSAS:		1. La automática no responde a la señal de control.					
CONSECUENCIAS:		1. No hay flujo de propano hacia los ER 's. 2. El compresor C-321 empezara a "patinar" por falta de vapores de propano y consecuentemente la carga a filtros y el solvente frío se calentaran.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG-302.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LG-302, LC-324 y LV-324.
4	2	7	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE: B							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



HOJAS HAZOP (cont.)

NUM. DE SESIÓN:		AREA O PROCESO:				Circuito de propano.	
NUM. DE SESIÓN:		NODO:				3. Enfriador ER-321 a ER-325	
10		MÁS NIVEL		PROPANO Y PRAFINA		R-11600-6	
CAUSAS:		1. La automática no responde a la señal de control.					
CONCECUENCIAS:		1. Llegada de propano líquido al compresor, provocando vibración y disparo del mismo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LAH-316. 2. LC-321. 3. LT-323A. 4. LG-305.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.
4	2	7	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							
11		MÁS NIVEL		PROPANO Y PRAFINA		R-11600-6	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LT-323 A.					
CONCECUENCIAS:		1. Llegada de propano líquido al compresor, provocando vibración y disparo del mismo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG-305. 2. LC-321.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.
4	2	7	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							
12		MENOS NIVEL		PROPANO		R-11600-5	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-321.					
CONCECUENCIAS:		1. Llegada de propano líquido al compresor, provocando vibración y disparo del mismo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LAH-316. 2. LG-305. 3. LT-323A.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.
4	2	7	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



HOJAS HAZOP (cont.)

13		MÁS NIVEL				PROPANO Y PRAFINA		R-11600-6	
CAUSAS:		1. La automática no responde a la señal de control.							
CONCECUENCIAS:		1. Enfriamiento deficiente del solvente.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LC-321. 2. LT-323A. 3. LG-305.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	
5	2	8	5	1	5				
RECOMENDACIÓN CLASE:									
14		MÁS NIVEL				PROPANO Y PRAFINA		R-11600-6	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LT-323 A.							
CONCECUENCIAS:		1. Enfriamiento deficiente del solvente.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LG-305. 2. LC-321.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	
5	2	8	5	1	5				
RECOMENDACIÓN CLASE:									
15		MÁS NIVEL				PROPANO Y PRAFINA		R-11600-6	
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-321.							
CONCECUENCIAS:		1. Enfriamiento deficiente del solvente.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LAH-316.		1. Instalar una alarma por bajo nivel en el ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	
5	2	8	5	1	5				
RECOMENDACIÓN CLASE:									

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).



HOJAS HAZOP (cont.)

ÁREA O PROCESO:		Circuito de propano.					
NODO :		3. Enfriador ER-321 a ER-325					
16	NO FLUJO	PROPANO Y PRAFINA	R-11600-6				
CAUSAS:		1. Cerrada la válvula de compuerta en la salida de vapores (no se verificó su apertura, compuerta caída).					
CONCECUENCIAS:		1. No hay vaporización del propano y consecuentemente no hay enfriamiento de solvente en ese equipo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. TI-50, indicador de temperatura a la salida del solvente en el equipo. 2. Lista de verificación de la puesta de operación del equipo.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-50.
3	2	6	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							
17	MÁS TEMPERATURA	PROPANO Y PRAFINA	R-11600-6				
CAUSAS:		1. Bajo nivel de propano.					
CONCECUENCIAS:		1. Baja presión en la succión del compresor.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG's del 307 al 303. 2. LC's del 319 al 323.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los LG's del 307 al 303 y a los LC's del 319 al 323.
3	2	6	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							
18	MÁS TEMPERATURA	PROPANO Y PRAFINA	R-11600-6				
CAUSAS:		2. Indicación errónea del indicador TI-50.					
CONCECUENCIAS:		1. Baja presión en la succión del compresor.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG's del 307 al 303. 2. LC's del 319 al 323.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-50 y a los LG's del 307 al 303.
3	2	6	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**HOJAS HAZOP (cont.)**

ÁREA O PROCESO:		Circuito de propano.							
NODO:		4. Trampa de líquidos de baja presión D-323							
NÚMERO DE HAZOP:		MÁS NIVEL		PROPANO		DIAGRAMA (S):			
19		MÁS NIVEL		PROPANO		R-11600-6			
CAUSAS:		1. Más nivel en el ER-321, E-325 A/B, enfriadores A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1 y D2.							
CONSECUENCIAS:		1. Disparo del compresor C-321A.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LAH-330.		1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-330, LT-330, LG-331 y LG-348.	
5	2	8	5	2	8	2. LT-330.			
						3. LG-331 y 348.			
RECOMENDACIÓN CLASE:									
20		NO FLUJO		PROPANO		R-11600-6			
CAUSAS:		1. Cerrada la válvula de compuerta en la entrada de vapores al paso 1 del compresor (no se verificó su apertura, compuerta caída).							
CONSECUENCIAS:		1. El compresor entra en fenómeno de surge, represionando todo el circuito de propano.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. PCV-322/322A, válvulas automáticas en la línea anti-surge del primer paso.		1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los medidores de presión y a las PCV-322/322A.	
2	2	4	2	2	4	2. Indicadores de presión en la trampa y en la succión del compresor.			
RECOMENDACIÓN CLASE:									

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



HOJAS HAZOP (cont.)

		AREA O PROCESO:				Circuito de propano.			
		NODO :				5. Enfriador A1			
21		MAS NIVEL EN EL ACUMULADOR DE PROPANO		PROPANO Y CARGA		R-11600-11			
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor LC-336, no enviando señal de nivel alto a la válvula PCV-305A.							
CONCECUENCIAS:		1. Más nivel en la trampa de vapor D-323, por arrastre de líquidos en la fase gaseosa.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LG-348 y 331		1. Instalar una alarma por alto nivel en el acumulador de propano del Enfriador A1 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al LC-336 y a los LG-348 y 331.	
5	2	8	5	2	8				
RECOMENDACIÓN CLASE:								A	
22		MAS NIVEL EN EL ACUMULADOR DE PROPANO		PROPANO Y CARGA		R-11600-11			
CAUSAS:		1. La automática no responde a la señal de control.							
CONCECUENCIAS:		1. Más nivel en la trampa de vapor D-323, por arrastre de líquidos en la fase gaseosa.							
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:		RECOMENDACIONES:	
F	G	R	F	G	R	1. LG-348 y 331.		1. Instalar una alarma por alto nivel en el acumulador de propano del Enfriador A1 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al LC-336 y a los LG-348 y 331.	
5	2	8	5	2	8				
RECOMENDACIÓN CLASE:								A	

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).



HOJAS HAZOP (conf.)

		AREA O PROCESO:			Circuito de propano.		
		NODO :			5. Enfriador A1		
23		MENOS NIVEL EN EL ACUMULADOR DE PROPANO			PROPANO Y CARGA		R-11600-11
CAUSAS:		1. La válvula automática no responde a la señal de control.					
CONSECUENCIAS:		1. Enfriamiento deficiente de la carga a filtros.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
5	2	8	5	1	8	1. LC-336 2. TI-307B	1. Continuar con la toma de lecturas de temperaturas en registrador de tablero de acuerdo a programa. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: PCV-305A, LC-336 y TI-307B.
RECOMENDACIÓN CLASE:							
24		MENOS NIVEL EN EL ACUMULADOR DE PROPANO			PROPANO Y CARGA		R-11600-11
CAUSAS:		1. Falsa señal en el transmisor LC-336.					
CONSECUENCIAS:		1. Enfriamiento deficiente de la carga a filtros.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
5	2	8	5	1	8	1. TI-307B	1. Continuar con la toma de lecturas de temperaturas en registrador de tablero de acuerdo a programa. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: PCV-305A, LC-336 y TI-307B.
RECOMENDACIÓN CLASE:							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO TRES: TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.



HOJAS HAZOP (cont.)

		AREA O PROCESO:				Circuito de propano.	
		NODO :				5. Enfriador A1	
25		NO FLUJO		PROPANO Y CARGA		R-11600-11	
CAUSAS:		1. Cerrada la válvula de salida de vapores o la PV-305B.					
CONCECUENCIAS:		1. No hay vaporización del propano y no hay enfriamiento de la carga en ese equipo.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. TI-307B, indicador de temperatura a la salida de la carga en el equipo. 2. Lista de verificación de la puesta de operación del equipo.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-307B.
2	2	4	2	2	4		
RECOMENDACIÓN CLASE:							

		AREA O PROCESO:				Circuito de propano.	
		NODO :				6. Compresor C-321 A/B	
26		MENOS PRESIÓN EN LA SUCCIÓN.		PROPANO		R-11600-7	
CAUSAS:		1. Bajo nivel en el acumulador D-321.					
CONCECUENCIAS:		1. No hay enfriamiento del solvente y de la carga. 2. Daños al compresor. 3. Baja presión en la descarga del C-321 A/B. 4. Descontrol operacional.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R	1. LG-311. 2. LT-321. 3. LG-302. 4. PRC-302.	1. Instalar una alarma por bajo nivel en el tanque D-321 y en el D-322.
3	2	6	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:							

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



HOJAS HAZOP (cont.)

ÁREA O PROCESO:		Circuito de propano.					
NODO :		6. Compresor C-321 A/B					
NÚM. DE REGISTRO:		MENOS PRESIÓN EN LA SUCCIÓN.		PROPANO	R-11600-7		
27							
CAUSAS:		1. Alto nivel en la trampa D-323.					
CONCECUENCIAS:		1. Daños al compresor y descontrol operacional. 2. Baja presión en la descarga del C-321 A/B.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
5	2	8	5	2	8	1. LAH-330. 2. LG-331 y 348. 3. PRC-302.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-330, LT-330, LG-331 y LG-348. 2. Verificar el procedimiento de operación de los enfriadores y si es necesario actualizarlo. 3. Analizar, difundir y concientizar al personal operativo, las causas por las cuales se incrementa el nivel en el D-323.
RECOMENDACIÓN CLASE:							A

ÁREA O PROCESO:		Circuito de propano.					
NODO :		6. Compresor C-321 A/B					
NÚM. DE REGISTRO:		MENOS PRESIÓN EN LA DESCARGA.		PROPANO	R-11600-7		
28							
CAUSAS:		1. Falla en el aceite de lubricación del compresor.					
CONCECUENCIAS:		1. Daños al compresor y descontrol operacional.					
SIN PROTECCIONES:			CON PROTECCIONES:			PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:
F	G	R	F	G	R		
3	2	6	3	2	6	1. Indicador de nivel en el sistema de lubricación. 2. Manómetro en la descarga de la bomba del sistema de lubricación. 3. Indicador óptico y alarma por bajo nivel en el acumulador de aceite de lubricación. 4. Termoswitch T3. 5. Los manómetros PI a P5.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los sistemas de protección del sistema de lubricación del compresor, así como a las bombas.
RECOMENDACIÓN CLASE:							B

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



HOJAS HAZOP (cont.)

	AREA O PROCESO:		Circuito de propano.				
	NODO :		6. Compresor C-321 A/B				
NUM. DE SEÑAL:	DESCRIPCIÓN:	PROPIEDAD:	DIAGRAMA (S):				
29	MENOS PRESIÓN EN LA DESCARGA.	PROPANO	R-11600-7				
CAUSAS:		1. Mal funcionamiento del PRC-302.					
CONSECUENCIAS:		1. Daños al compresor y descontrol operacional.					
SIN PROTECCIONES:		CON PROTECCIONES:		PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:		
F	G	R	F	G	R	1. Programa de mantenimiento preventivo a instrumentos.	1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al PRC-302.
3	2	6	3	2	6		
RECOMENDACIÓN CLASE:						B	

	AREA O PROCESO:		Circuito de propano.				
	NODO :		6. Compresor C-321 A/B				
NUM. DE SEÑAL:	DESCRIPCIÓN:	PROPIEDAD:	DIAGRAMA (S):				
30	MAS TEMPERATURA EN LA DESCARGA.	PROPANO	R-11600-7				
CAUSAS:		1. Ensuciamiento en los enfriadores E-322 A/D.					
CONSECUENCIAS:		1. Disminución en el intercambio de calor entre el propano, el solvente y la carga.					
SIN PROTECCIONES:		CON PROTECCIONES:		PROTECCIONES:	RECOMENDACIONES:		
F	G	R	F	G	R	1. Ninguna.	1. Mejorar la calidad del agua de enfriamiento, procurando minimizar la cantidad de sólidos en suspensión. 2. Instalar diferencial de temperatura entre entrada y salida de agua y propano en los E-322.
3	1	3	3	1	3		
RECOMENDACIÓN CLASE:						C	

Figura III. 2. Hojas de las sesiones de Análisis HAZOP (continuación).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

**Recomendaciones del estudio HAZOP.**

Las recomendaciones que a continuación se presentan en las **Tablas III.1.a, b, c y d** son el resultado del análisis HAZOP y están clasificadas según su prioridad con la que deben de ser ejecutadas (clase A, B y C según la **Tabla II.12.**).

Recomendaciones	Desviación	Causa	Clase	Escenario
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-330, LT-330, LG-331 y LG-348.	Más nivel	La válvula automática no responde a la señal de control.	A	10
1. Instalar una alarma por alto nivel en el acumulador de propano del Enfriador A1 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al LC-336 y a los LG-348 y 331.	Más nivel en el acumulador de propano	1. Falsa señal en el transmisor LC-336, no enviando señal de nivel alto a la válvula PCV-305A	A	21
1. Instalar una alarma por alto nivel en el acumulador de propano del ENF. A1 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al LC-336 y los LG's 348 y 331.	Más nivel en el acumulador de propano	2. La válvula automática no responde a la señal de control.	A	22
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-330, LT-330, LG-331 y LG-348. 2. Verificar el procedimiento de operación de los enfriadores y si es necesario actualizarlo. 3. Analizar, difundir y concientizar al personal operativo, las causas por las cuales se incrementa el nivel en el D-323.	Menos presión en la succión	2. Alto nivel en la trampa LG-D-323.	A	27
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-329, LT 321 y LG-311.	Más nivel	1. Descuido en la recepción.	B	1
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el D-322.	Más nivel	2. Falsa señal de nivel del LC-324 (siempre y cuando al presentarse esta falla el nivel del acumulador D-321 sea igual o mayor al 80%).	B	2

Tabla III.1a. Recomendaciones del Análisis HAZOP.



CAPÍTULO TRES: TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.



Recomendaciones	Desviación	Causa	Clase	Escenario
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el tanque D-321 y en el D-322.	Menos nivel	1. No hay recibo de propano con nivel mínimo de operación (menor a 20 in).	B	3
1. Análisis previos y durante el recibo de propano. 2. Mantener la comunicación estrecha con la planta FCC cuando se este recibiendo propano.	Presencia de 40% de compuestos diferentes al propano.	1. Al estar recibiendo propano fresco de FCC hay descontrol en esta planta y cambia la composición a un 50% de propleno en el propano de recibo.	B	4
1. Mantener la comunicación estrecha con la planta RG-1 cuando se este recibiendo propano. 2. Análisis previo al recibo de propano.	Presencia de 40% de compuestos diferentes al propano.	2. Recibo de propano contaminado de los tanques de almacenamiento de RG-1.	B	5
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-325, LG-302, LC-324, LV-324 y LV-325	Más nivel	1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-324.	B	6
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-325, LG-302, LC-324, LV-324 y LV-325.	Más nivel	2. La automática no responde a la señal de control.	B	7
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LG-302, LC-324 y LV-324.	Menos nivel	1. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-324.	B	8
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LG-302, LC-324 y LV-324.	Menos nivel	2. La automática no responde a la señal de control.	B	9
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Más nivel	1. La automática no responde a la señal de control.	B	10
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Más nivel	2. Falsa señal en el transmisor de nivel LT-323 A.	B	11
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Más nivel	3. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-321.	B	12
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el LG-ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Menos nivel	1. La automática no responde a la señal de control.	B	13

Tabla III.1b. Recomendaciones del Análisis HAZOP.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



CAPÍTULO TRES: TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.



Recomendaciones	Desviación	Causa	Clase	Escenario
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el LG-ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Menos nivel	2. Falsa señal en el transmisor de nivel LT-323 A.	B	14
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el LG-ER-323. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: LAH-316, LC-321, LT-323A y LG-305.	Menos nivel	3. Falsa señal en el transmisor de nivel LC-321.	B	15
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-50.	No flujo	1. Cerrada la válvula de compuerta en la salida de vapores (no se verificó su apertura, compuerta caída)	B	16
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los LG's del 307 al 303 y a los LC's del 319 al 323.	Más temperatura	1. Baja nivel de propano.	B	17
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-50 y a los LG's del 307 al 303.	Más temperatura	2. Indicación errónea del indicador TI-50.	B	18
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los medidores de presión y a las PCV-322/322A.	Más temperatura	1. Cerrada la válvula de compuerta en la entrada de vapores al paso 1 del compresor (no se verificó su apertura, compuerta caída).	B	20
1. Continuar con la toma de lecturas de temperaturas en registrador de tablero de acuerdo a programa. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: PCV-305A, LC-336 y TI-307B.	Menos nivel en el acumulador de propano	1. La automática no responde a la señal de control.	B	21
1. Continuar con la toma de lecturas de temperaturas en registrador de tablero de acuerdo a programa. 2. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a: PCV-305A, LC-336 y TI-307B.	Menos nivel en el acumulador de propano	2. Falsa señal en el transmisor LC-336.	B	22
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al TI-307B.	No flujo	1. Cerrada la válvula de salida de vapores o la PV-305B.	B	25

Tabla III.1c. Recomendaciones del Análisis HAZOP.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Recomendaciones	Desviación	Causa	Clase	Escenario
1. Instalar una alarma por bajo nivel en el tanque D-321 y en el D-322.	Menos presión en la succión	1. Bajo nivel en el acumulador LG-D-321.	B	26
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo a los sistemas de protección del sistema de lubricación del compresor, así como a las bombas.	Menos presión de descarga	1. Falla en el aceite de lubricación del compresor.	B	28
1. Cumplir con el programa establecido de mantenimiento preventivo al PRC-302.	Menos presión de descarga	2. Mal funcionamiento del PRC-302.	B	29
1. Mejorar la calidad del agua de enfriamiento, procurando minimizar la cantidad de sólidos en suspensión. 2. Instalar diferencial de temperatura entre entrada y salida de agua y propano en los E-322.	Mas temperatura en la descarga	1. Ensuciamiento en los enfriadores E-322 A/D.	C	30

Tabla III.1d. Recomendaciones del Análisis HAZOP.

iv. Análisis del Árbol de Fallas

En la **Tabla III.2.** se muestra el escenario que fue seleccionado para el estudio de Análisis de Árbol de Fallas, así como las causas que lo podrían generar y los alcances de sus consecuencias.

ESCENARIO DE ACCIDENTE	CAUSA / FUNDAMENTO	CONSECUENCIAS
Paro del compresor: C-321.	<p>El compresor C-321 puede pararse por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja presión de aceite de lubricación, por nivel bajo en el recipiente de aceite de sellos. • Por nivel alto en el recipiente de aceite de sellos. • Por falla del check a la descarga del C-321. • Por falla de vapor de alimentación a la turbina. • Por baja velocidad en la turbina. • Bajo nivel en el acumulador D-321. • Alto nivel en la trampa D-323. • Mal funcionamiento del PRC-302. 	<ul style="list-style-type: none"> • Daños internos al compresor y a su sistema de instrumentación. • Descontrol operacional por la falta de propano ocasionando descontrol operacional por la falta de propano para enfriamiento.

Tabla III. 2. Descripción del escenario considerado para el análisis de Árbol de Fallas.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Este escenario fue seleccionado solo para mostrar la secuencia de fallas que ocasionarían un paro del compresor, y no por que este evento realmente ocurra o haya sucedido.

También hay que mencionar que en el compresor C-321 se maneja propano de 76.2 % de pureza y de ocurrir una falla ocasiona inestabilidad operacional pudiendo provocar fugas, incendio y pérdidas de productos. A continuación se presentan los planos del Árbol de Fallas "original" (Planos AFC1 al 5) que fue generado por el análisis, antes de aplicársele el álgebra booleana.

Recomendaciones del análisis del árbol de fallas

Los árboles se pueden reestructurar utilizando la técnica conocida como análisis de conjuntos mínimos (Minimal Cut Set Analysis) la cual consiste en eliminar los eventos básicos, secundarios e intermedios redundantes expresando las conexiones lógicas, Y y O, en función del álgebra de Boole. Las reglas que se aplican con más frecuencia en el análisis de árbol de fallas se muestran en el Apéndice B.

Una vez reducido el árbol de fallas, se observa que hay eventos intermedios que pueden ser eliminados siguiendo algunas recomendaciones. En las **Tablas 3.a y b** se presentan tanto las recomendaciones resultantes del análisis de árbol de fallas como la causa de la cual se generaron.

A continuación se presentan dos conjuntos de planos del Arbol de Fallas, el primer conjunto de planos se refiere una vez que se le ha aplicado el procedimiento matemático de conjuntos mínimos al Árbol de Fallas "original" (Planos AFCCM1 al 3), mientras que el segundo conjunto (Planos AFCCRECOM1 al 3) se refiere al Árbol de Fallas que se observa después de haber sido implementadas las recomendaciones descritas en las tablas anteriores. También se presentan las probabilidades de cada evento en ambos conjuntos de planos.

v. Análisis de Consecuencias.

El análisis de consecuencias (AC) proporciona información sobre los efectos que se producirían en caso de una explosión ó ruptura de una línea de proceso ó de un recipiente que almacena un líquido peligroso, así como los efectos de una explosión ó incendio de una nube de gas no confinada. Las explosiones e incendios pueden causar



CAPÍTULO TRES: TRABAJO DE CAMPO Y RESULTADOS.

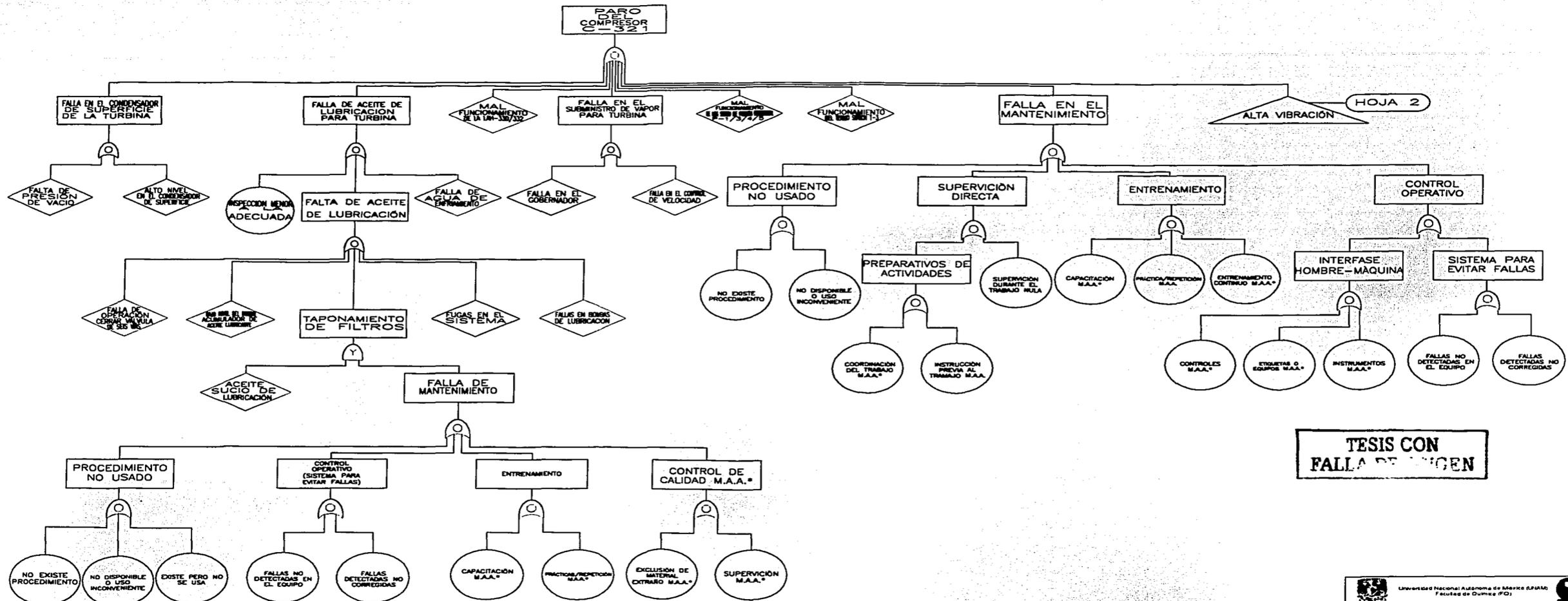


daños por quemaduras directas ó por radiación térmica, daños por proyectiles ó daños por ondas de presión.

COMPRESOR C-321		
#	CAUSA	RECOMENDACIONES
1	Alta temperatura en el compresor.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mantener el nivel de aceite de lubricación, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y asegurar el buen funcionamiento del sistema de lubricación. 2. Dar mantenimiento al sistema de lubricación de acuerdo a programa. 3. Continuar con el mantenimiento preventivo/predictivo de acuerdo a programa. 4. Continuar con el patrullaje operacional
2	Mala operación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asegurar que se capacite adecuadamente al personal de operación con suficientes prácticas y continuar dando capacitación al personal ya calificado. 2. Asegurar el cumplimiento de los procedimientos operacionales al 100%. 3. Asegurar que el procedimiento de operación exista, este actualizado, sea el adecuado y que sea utilizado. 4. Asegurar que se apliquen las listas de verificación de movimientos operacionales para evitar que alguna válvula quede cerrada o abierta, según sea el caso. 5. Continuar con el patrullaje operacional.
3	Falla de mantenimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asegurar que el procedimiento de mantenimiento exista, este actualizado, sea el adecuado y que sea utilizado. 2. Asegurar el cumplimiento total del mantenimiento en las fechas establecidas para realizarlo. 3. Contar con el refaccionamiento adecuado y original, así como con los dispositivos y herramientas necesarias para poder realizar el trabajo. 4. Asegurar que se reporten todas las fallas del equipo para que mantenimiento las pueda corregir. 5. Asegurar que se capacite adecuadamente al personal que realizará el mantenimiento con suficientes prácticas y continuar dando capacitación al personal ya calificado. 6. Asegurar que se realice la supervisión de actividades para disminuir las omisiones de actividades.
4	Daño al sello.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar la adecuada instalación del compresor. 2. Verificar que el sello sea adecuado y su instalación correcta. 3. Verificar la alineación de la flecha.
5	Falla de instrumentación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asegurar el mantenimiento a instrumentos y lazos de control en las fechas establecidas en el programa. 2. Contar con el refaccionamiento adecuado y original.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla III. 3. Causas y recomendaciones generadas por el Análisis de Fallas.



HOJA 2

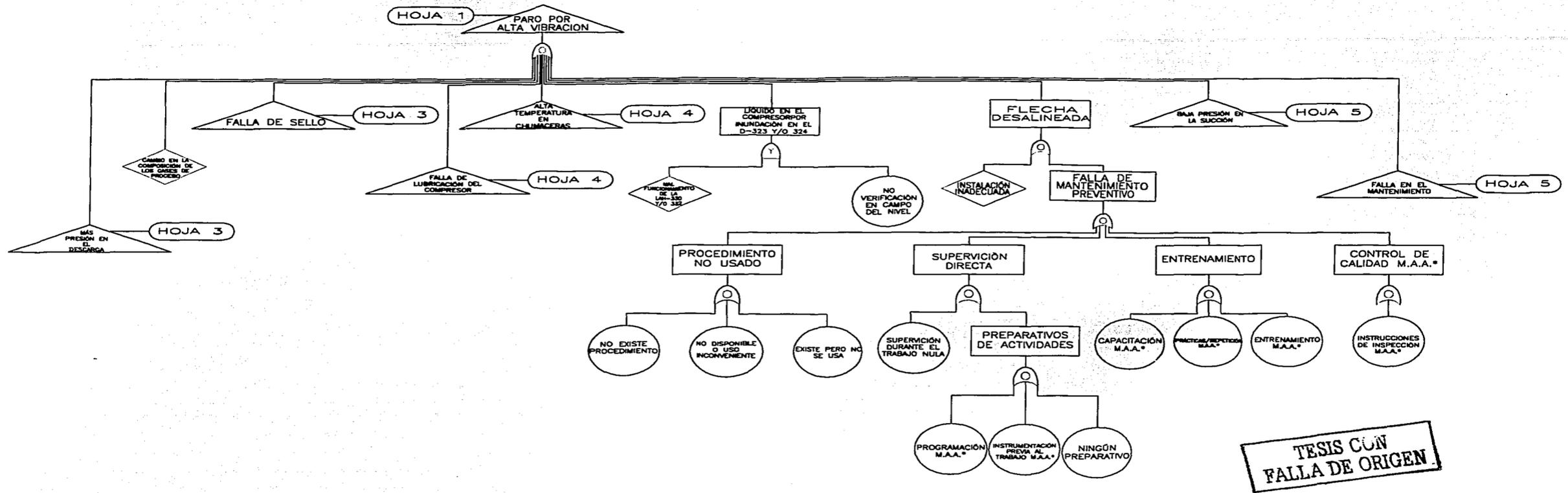
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ARBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR
 DE PROPANO C-321 A/B
 DE LA PLANTA LG (HOJA 1)

DIBUJADO POR:
 AFC-1



TESIS CON FALLA DE ORIGEN.

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO


 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR
 DE PROPANO C-321 A/R
 DE LA PLANTA LG (HOJA 2)

Dibujo No. 1:
AFC2 (HOJA2)

HOJA 2

FALLA DE SELLO

HOJA 2

MÁS PRESIÓN EN LA DESCARGA

FALLA DE ENFRÍAMIENTO AL SISTEMA DE ACEITE

ACEITE SUCIO DE SELLOS

FALTA DE ACEITE DE SELLOS

MAL FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA DE SEIS PASOS

FALLA EN LA CHECK DE DESCARGA

CERRADA LA VALVULA DE DESCARGA DEL COMPRESOR

TAPONAMIENTO DE FILTROS

FALLA BOMBAS DE SELLO DE ACEITE

BAJO NIVEL DEL ACUMULADOR DE ACEITE

M.P.P.** MENOR AL ADECUADO

PARTES DEFECTUOSAS O EQUIVOCADAS

REPETICIÓN DE LA FALLA

FALLA DE MANTENIMIENTO

ACEITE DE SELLOS SUCIO

FALLA EN LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN

FUGA EN EL TANQUE

NO SE APLICA

DEFICIENTE

ABASTECIMIENTO

CONTROL DE CALIDAD

ACCIONES CORRECTIVAS M.A.A.*

ACCIONES CORRECTIVAS ADM NO IMPLEMENTADAS

PROCEDIMIENTO NO USADO

CONTROL OPERATIVO (SISTEMA PARA EVITAR FALLAS)

ENTRENAMIENTO

CONTROL DE CALIDAD M.A.A.*

ESPECIFICACIÓN DEL DISEÑO

FALLAS INESPERADAS

M.P.P.** MENOR AL ADECUADO

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

NO EXISTE PROCEDIMIENTO

NO DISPONIBLE O USO INCÓMODO

EXISTE PERO NO SE USA

FALLAS NO DETECTADAS EN EL EQUIPO

FALLAS DETECTADAS NO CORREGIDAS

CAPACITACIÓN M.A.A.*

PRÁCTICAS REPETICIÓN M.A.A.*

TÉCNICA DE INSPECCIÓN M.A.A.*

SUPERVISIÓN M.A.A.*

ESPECIFICACIONES M.A.A.*

DISEÑO NO APROPIADO O NO ESPECIFICADO

NO SE APLICA

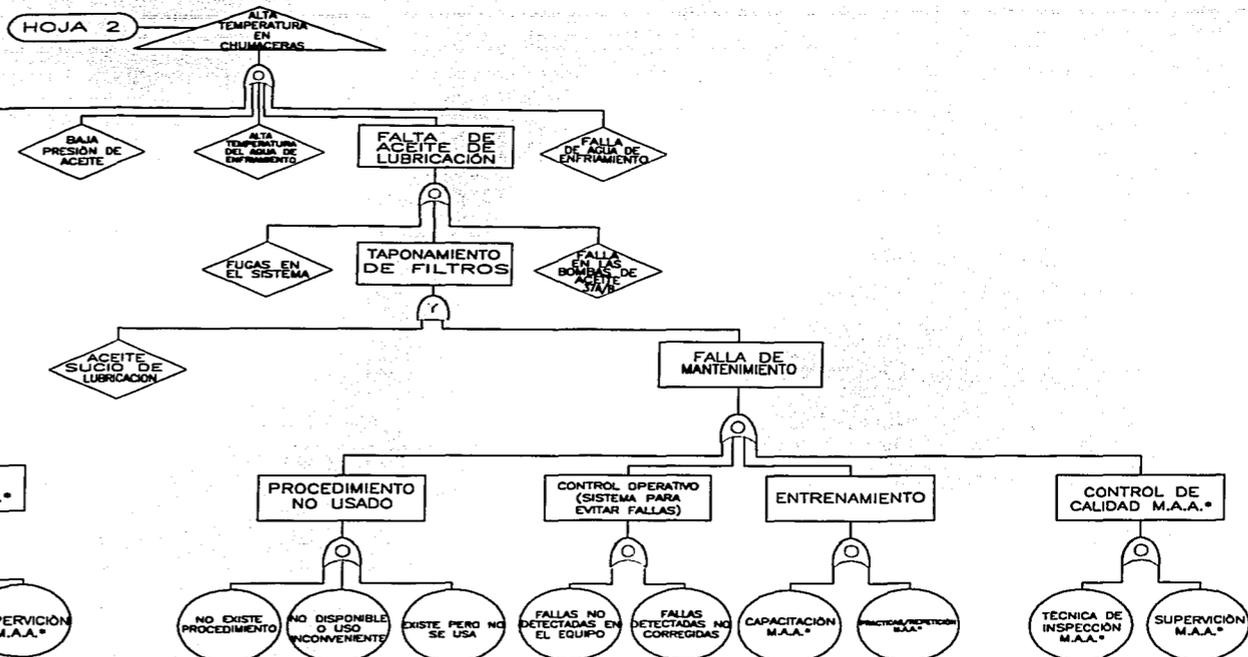
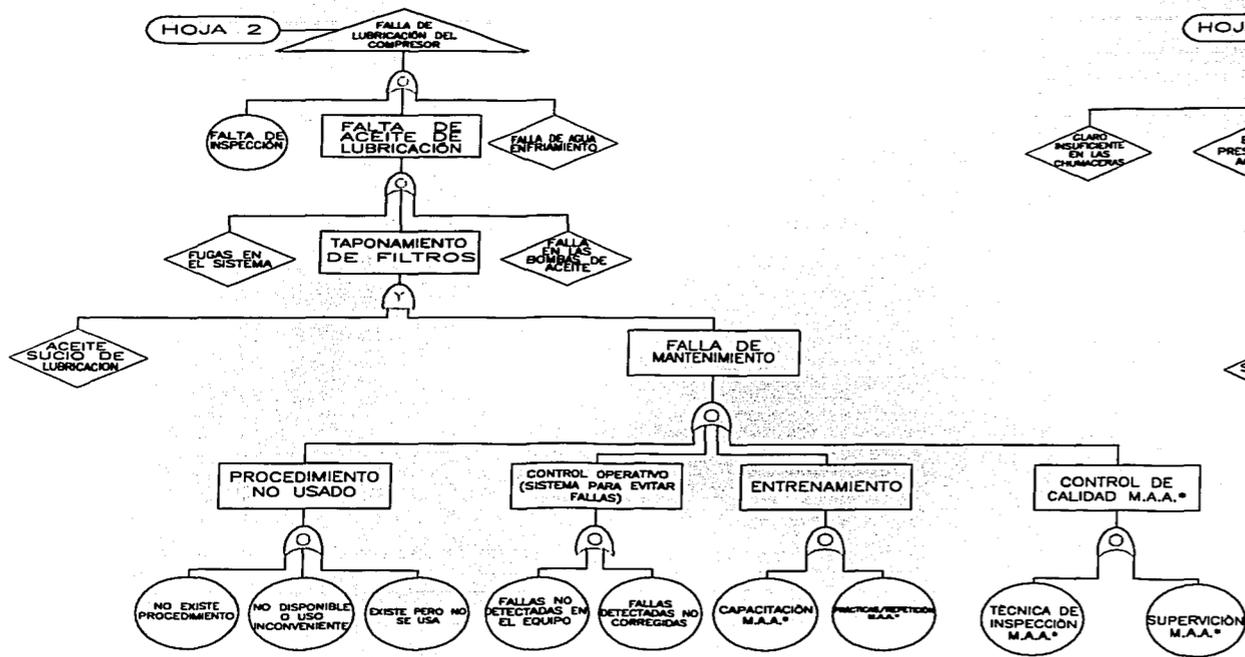
DEFICIENTE

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR DE PROPANO C-321 A/B DE LA PLANTA LG (HOJA 3)

AFC3 (HOJA 3)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO


 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR DE LA PLANTA LG (HOJA 4)

AFC4 (HOJA 4)

HOJA 2

BAJA PRESIÓN EN LA SUCCIÓN

CONDICIÓN ALIENígenA
DEBIDA AL
ALMACENAMIENTO DE
LAS PIEZAS DE
LAS VÁLVULAS

FALLA DEL
PIC-322/A

M.P.P.** MENOR AL
ADECUADO

REPETICIÓN DE LA
FALLA

FALLAS
INESPERADAS

EQUIPO/PARTES
DEFECTUOSAS

NO SE APLICA

DEFICIENTE

ACCIONES
CORRECTIVAS
M.A.A.*

ACCIONES
CORRECTIVAS
AUN NO
IMPLEMENTADAS

ABASTECIMIENTO

MANEJO

ALMACENAMIENTO

CONTROL
DE
CALIDAD

HOJA 2

FALLA EN EL
MANTENIMIENTO

PROCEDIMIENTO
NO USADO

SUPERVISIÓN
DIRECTA

ENTRENAMIENTO

CONTROL
OPERATIVO

NO EXISTE
PROCEDIMIENTO

NO DISPONIBLE
O USO
INCONVENIENTE

PREPARATIVOS DE
ACTIVIDADES

SUPERVISIÓN
DURANTE EL
TRABAJO NULA

CAPACITACIÓN
M.A.A.*

PRÁCTICA/EXPERIENCIA
M.A.A.*

ENTRENAMIENTO
CONTINUO
M.A.A.*

INTERFASE
HOMBRE-MÁQUINA

SISTEMA PARA
EVITAR FALLAS

COORDINACIÓN
DEL TRABAJO
M.A.A.*

INSTRUCCIÓN
PREVIA
AL
TRABAJO
M.A.A.

CONTROLES
M.A.A.*

ETIQUETAS
O EQUIPOS
M.A.A.*

INSTRUMENTOS
M.A.A.*

FALLAS NO
DETECTADAS EN
EL EQUIPO

FALLAS
DETECTADAS NO
CORREGIDAS

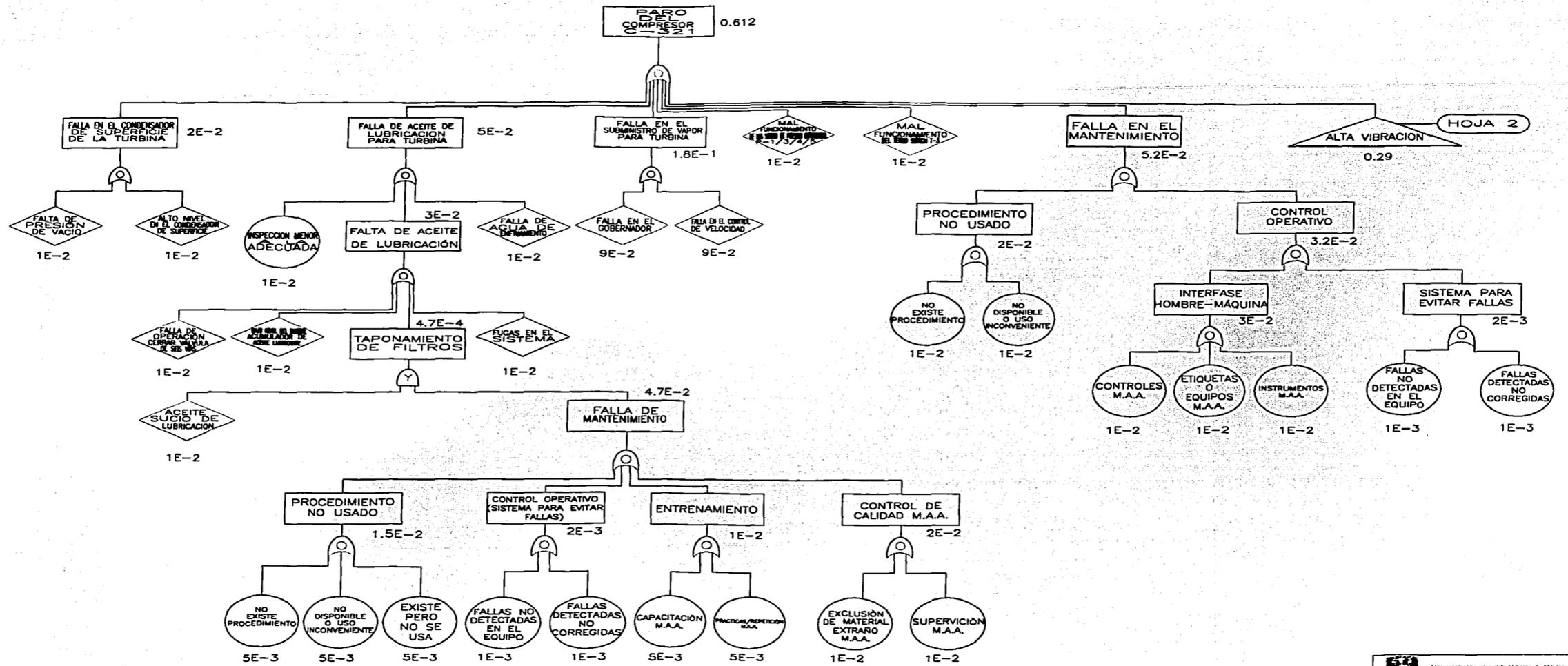
TEGUS CON
FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO


 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ÁRBOL DE FALLAS DEL COMPRESOR
 DE PROPANO C-321 A/B
 DE LA PLANTA LG (HOJA 5)

DISEÑO: ...
 AFC5 (HOJA 5)



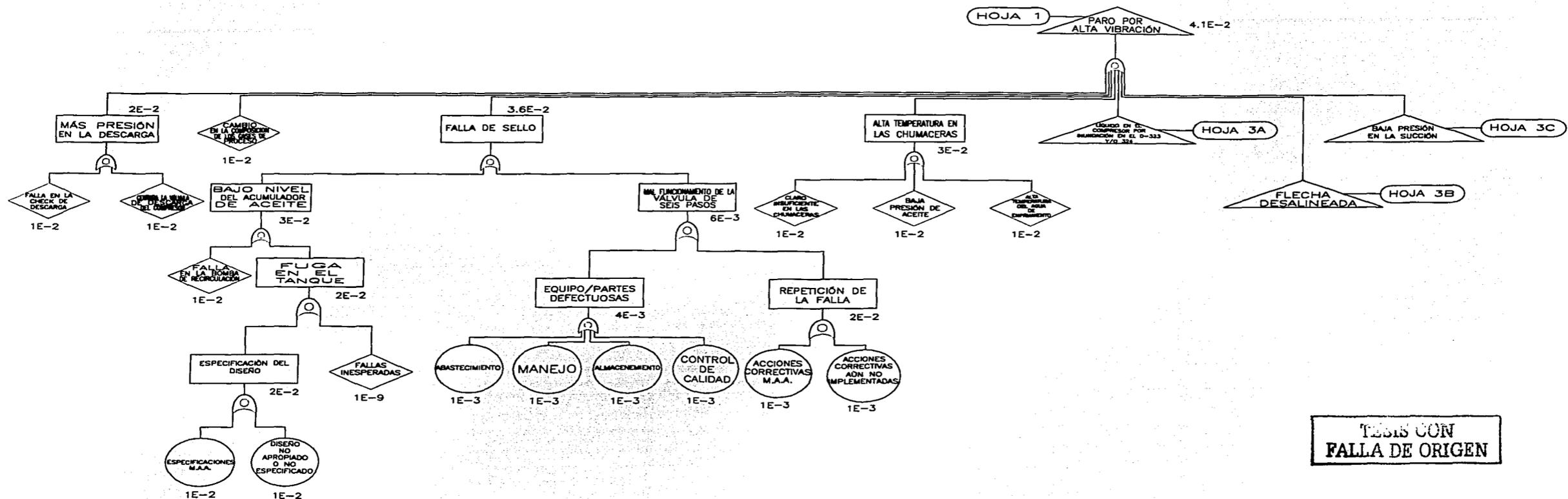
HOJA 2

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ARMOL DE FALLAS DEL COMPRESOR DE
 PROPANO C-321 A/B DE LA
 PLANTA LG. CONJ. MIN. (HOJA 1)

AFCCM1 (HOJA 1)



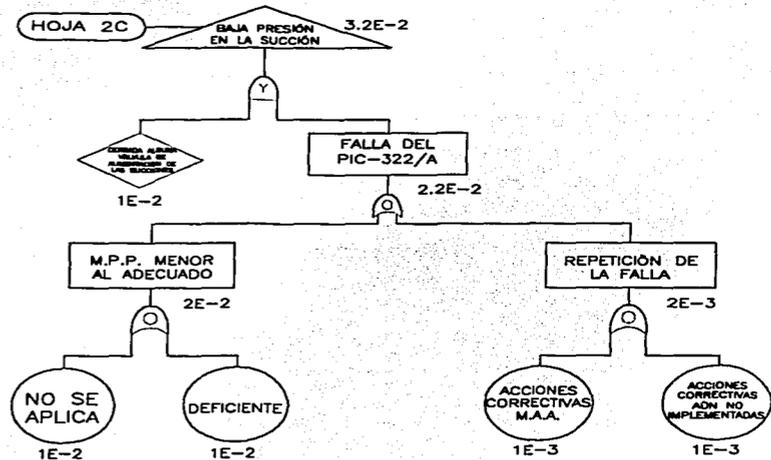
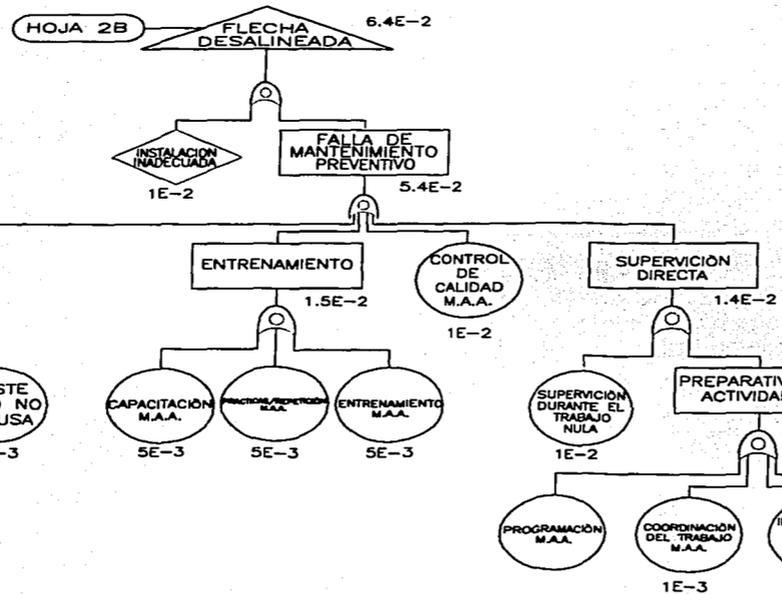
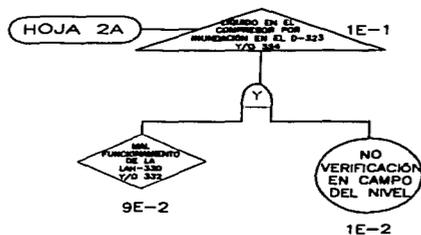
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ANÁLISIS DE FALLAS DEL COMPRESOR DE
 PRESIÓN 0-333 A/B DE LA
 PLANTA LG. CONJ. MIN. (HOJA 2)

AFCCM2 (HOJA2)



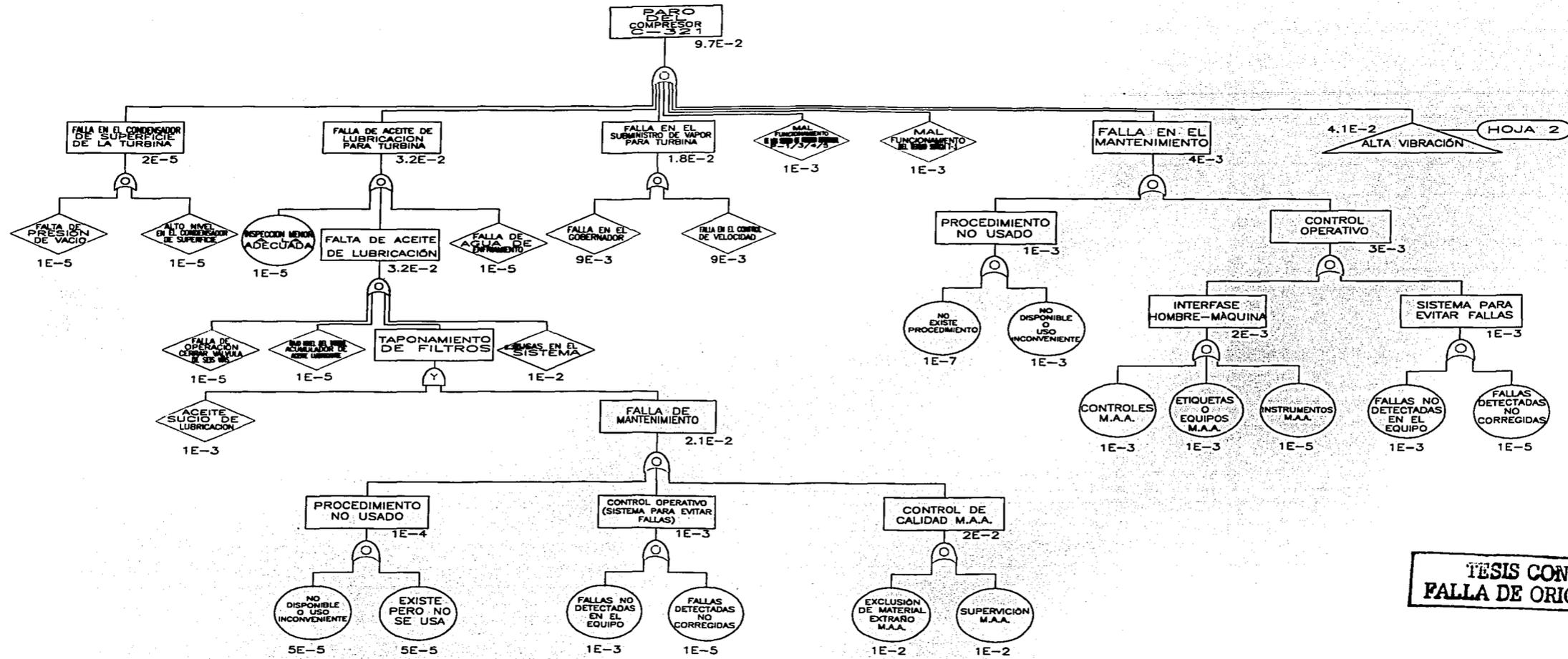
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
ARROL DE FALLAS DEL COMBUSTOR DE PROPANO 3231 A/B EN LA PLANTA LG. CONJ. MIN. SIGUA 33

AFCCM3 (HOJA3)



HOJA 2

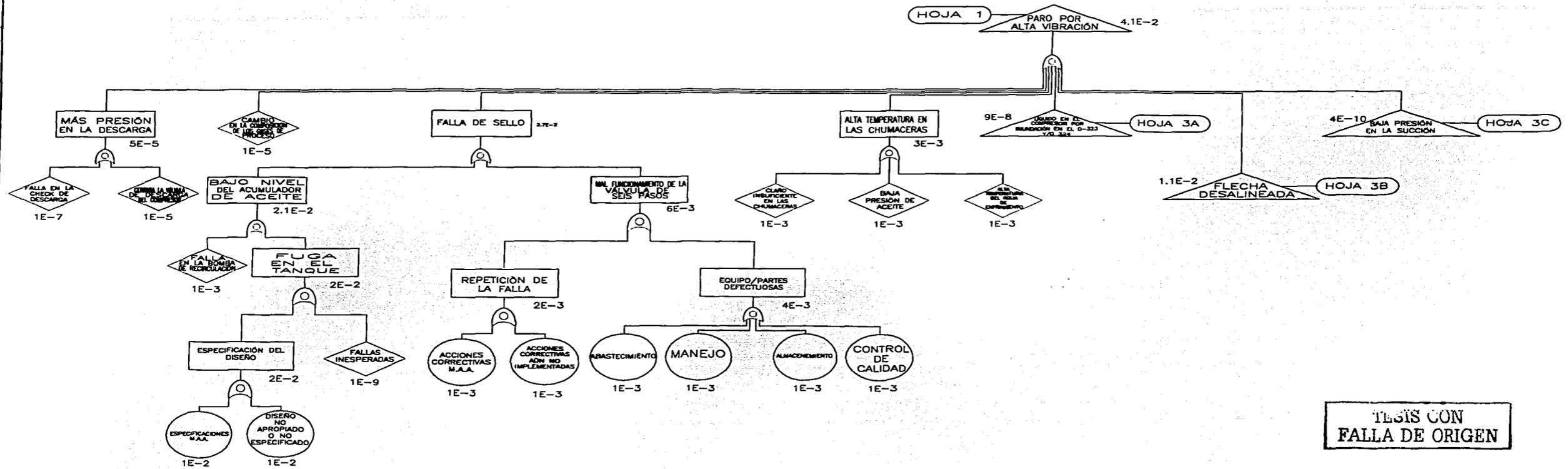
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)

TÍTULO DEL DIBUJO:
 ANÁLISIS DE FALLAS DEL COMPRESOR DE
 PROYECTO 2001 PARA LA
 PLANTA DE GASES CALIENTES MIN. CERRILLO 13

AFCRECOM1 (HOJA1)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

M.A.A.: MANTENIMIENTO MENOR AL ADECUADO
 M.P.P.: MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)
 TÍTULO DEL DIBUJO:
 ANÁLISIS DE FALLAS DEL COMPRESOR DE
 AIRE EN EL SISTEMA DE LA
 PLANTA DE REGENERACIÓN (HOJA 2)
 DIBUJADO POR:
AFCRECOM2 (HOJA2)



El análisis se lleva a cabo alimentando datos reales de la unidad de desparafinación al programa PHAST Professional Versión 6.0.

Este programa da como resultado los efectos de un evento indeseable; en este caso se usaron cuatro modelos para distintas etapas del evento. El primero se utilizó para conocer los parámetros de descarga como son: velocidad, tiempo, proporción, etc., valores indispensables para cualquier cálculo posterior. El segundo sirvió para determinar las condiciones del material una vez que se ha fugado y cuando se propaga a través de las zonas cercanas a la fuga. El tercer modelo fue utilizado para determinar el alcance de una explosión de una nube de vapor producida por el propano fugado. Finalmente el cuarto modelo se empleó para modelar una BLEVE ocasionada en el recipiente en el que se encuentra la fuga.

Evaluación de efectos de incendio y explosión.

En esta parte del estudio de riesgos, se presentan los resultados de la evaluación de efectos de incendio y explosión del escenario: **Fuga por brida en el tanque D-321**, el cual fue considerado como uno de los de mayor riesgo de incendio y explosión. Este escenario fue seleccionado para determinar sus radios, aun cuando la posibilidad de que ocurra sea muy baja, ya que el programa de calibración de líneas mantiene un control exacto del desgaste de las mismas, determinando de esta manera su límite de retiro, con lo que se evita la posible fuga de cualquier conexión en cualquier sección de la planta. A continuación se describe el escenario de incendio y explosión seleccionado y sus posibles causas y efectos; así como también los modelos de evaluación de riesgos usados.

Descripción del suceso.

Se tomó como escenario la fuga por la brida de unión entre el tanque D-321 y la línea 8"-LG-70-B. Esta línea transporta una mezcla de líquidos cuya composición es la siguiente:

Componente	% Vol.
<i>Propano</i>	76.2
<i>Propileno</i>	19.2
<i>Isobutano</i>	3.5
<i>Butileno</i>	1.1

Tabla III. 4. Composición de la línea de propano 8"-LG-70-B.

Se optó por él debido a lo siguiente:

TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN



- El riesgo potencial de llevar propano y propileno que son gases altamente inflamables con un amplio límite de explosividad (ver hojas de seguridad de estas sustancias en el **Apéndice D**).
- La gravedad de las consecuencias que el suceso podría acarrear.
- La conveniencia de saber como sería la situación de presentarse el suceso.

Los datos ingresados al programa se muestran en las siguientes dos tablas.

Cabe señalar que en el rubro de Estabilidad Climatológica de la **Tabla III.4**, se optó por la opción F del menú del programa PHAST Professional Versión 6.0, por ser el más cercano a las condiciones que imperan en la zona donde se encuentra ubicada la planta desparafinadora.

ESCENARIO	FUGA
Material	Propano-propileno
Temperatura de operación	15 °C
Presión de operación	16.18 bar
Masa de material en el tanque	8 675.06 g
Velocidad del viento:	1.50 m/s
Estabilidad Climatológica:	F
Modelo de explosión	TNT

Tabla III. 5. Datos generales usados en el Programa PHAST Profesional

Tipo de contenedor:	Tanque horizontal cilíndrico
Clave en campo	LG-D-321
Longitud	6 m
Diámetro	2 m
Volumen total	23.04 m ³
Peso total	12 392.94 kg
Diámetro de la fuga	10 mm

Tabla III. 6. Datos generales del tanque contenedor de Propano líquido.

Resultados del análisis de consecuencias.

Del programa PHAST se obtuvieron los siguientes resultados:

Fración de líquido:	0.72
Temperatura final:	- 43.55 °C
Velocidad final:	182.33 m/s
Diámetro de atomización:	4.75626 10-3 mm
Flujo másico:	1.47 kg/s
Duración de la descarga:	3 600 s
Estado físico del material	LIQUIDO / GAS

Tabla III. 7. Datos generales de la descarga de Propano.





En la **Tabla III. 8.** siguiente se puede observar que a 29.47 m la concentración de propano / propileno es mínima y se alcanza en un tiempo de 5 minutos, se puede decir que es el área segura. En el plano AC-1, se observa como es que la concentración de propano / propileno se va dispersando en la planta LG.

De acuerdo a la **Tabla III. 9.** la máxima radiación que se generaría por la explosión de la nube de vapor es de 37.5 kW/m² y abarcaría una distancia de 31.29 m.

En la **Tabla III. 10.** se muestran las sobrepresiones que se generarían con la explosión de la nube así como las distancias a las que se alcanzan. En el plano FQ-332-II-AC-1 se pueden identificar 4 sobre presiones y las áreas de afectación en la planta desparafinadora.

	Concentración lineal (ppm)	Tiempo (s)	Densidad de la nube (kg/m ³)
0.00	0.80	0.00	8.45
0.00	0.80	0.00	8.45
0.10	0.80	0.00	5.67
0.30	0.80	0.00	3.80
0.70	0.80	0.01	2.64
1.50	0.80	0.02	2.03
2.30	0.80	0.03	1.75
3.90	0.79	0.08	1.49
5.50	0.78	0.16	1.40
7.10	0.76	0.27	1.36
7.90	0.74	0.34	1.34
8.70	0.72	0.41	1.33
9.50	0.71	0.50	1.33
10.30	0.69	0.59	1.32
11.90	0.67	0.81	1.31
13.50	0.63	1.06	1.31
15.10	0.60	1.35	1.30
16.70	0.55	1.68	1.30
19.90	0.43	2.47	1.29
23.09	0.26	3.42	1.29
26.28	0.04	4.56	1.28
29.47	0.00	5.87	1.28

Tabla III. 8. Datos generales de la dispersión de Material (Propano).

Nivel de radiación (kW/m ²)	Distancia (m)
4	44.60
12.5	38.20
37.5	31.30

Tabla III. 9. Relación de la Radiación y la distancia por la explosión de la nube inflamable.

TESIS CON
FALLA DE OXÍGENO



Distancia (m)	Sobrepresión (bar)
0.00	1.00
10.00	0.27
20.00	0.09
30.00	0.05
40.00	0.03
50.00	0.03
60.00	0.02
70.00	0.02
80.00	0.01
90.00	0.01
100.00	0.01

Tabla III. 10. Relación de la distancia y Sobrepresión generada por la explosión de la nube inflamable.

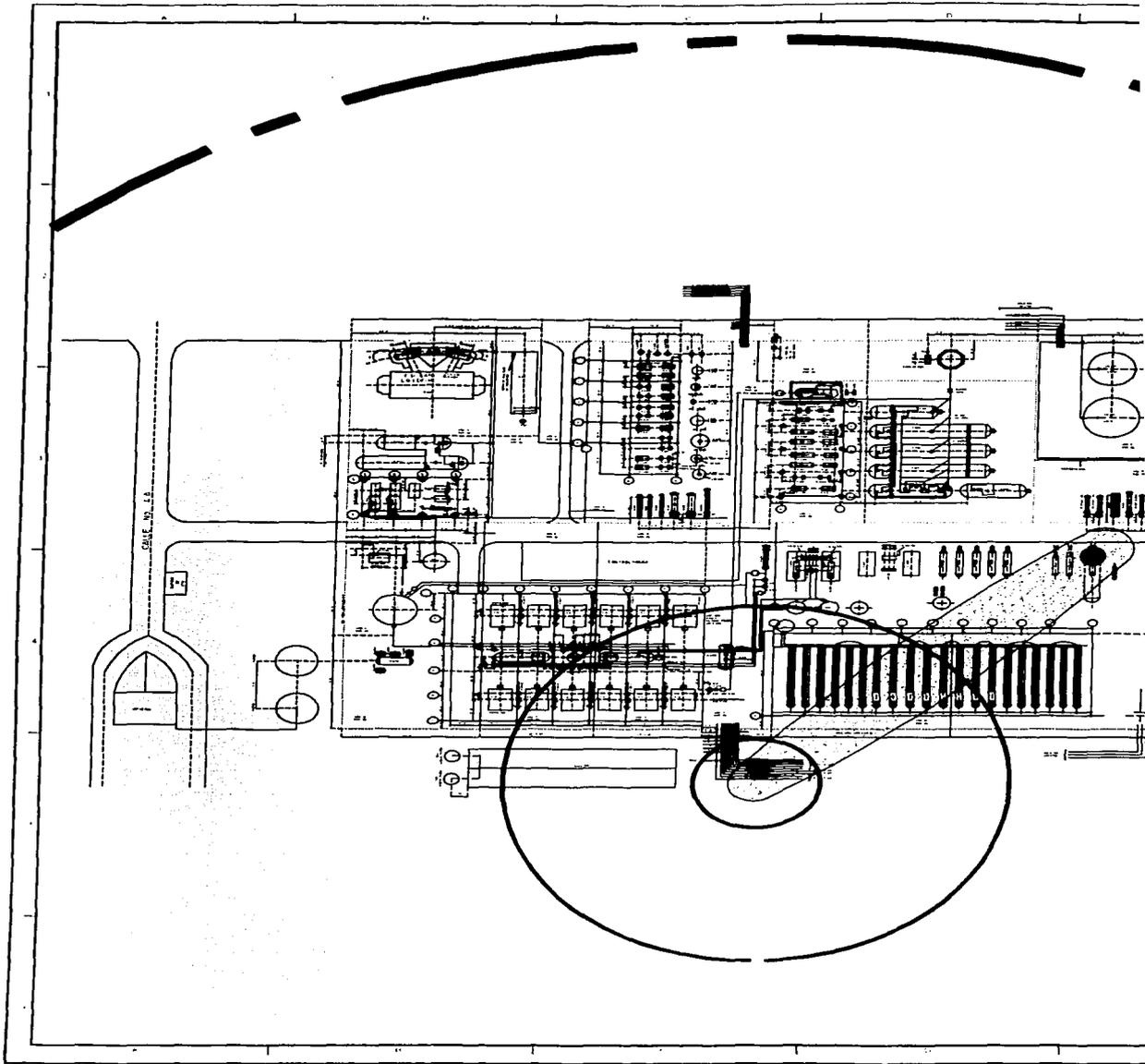
Radio de la BLEVE	57.36 m
Duración de la BLEVE	8.90 s
Poder de emisión de la BLEVE	232.02 kW/m ²

Tabla III. 11. Datos de la BLEVE producida en el contenedor de propano D-321.

Recomendaciones del análisis de consecuencias

De acuerdo a los resultados de los modelos aplicados al escenario planteado es posible dar algunas recomendaciones a fin de contribuir a la mejor respuesta por parte del personal al escenario planteado.

- 1) Asegurar el cumplimiento del mantenimiento predictivo a la corrosión de la línea 8"-LG-70-B que descarga propano líquido a el tanque D-321, para que cualquier fractura pueda ser detectada a tiempo.
- 2) Revisar el plan de emergencias y las rutas de evacuación de acuerdo con los resultados del análisis, estableciendo las zonas de seguridad.
- 3) Difundir los riesgos de incendio y/o explosión hacia todo el personal de la planta.



**CAPÍTULO CUATRO:
CONCLUSIONES.**





*El miedo atento y previsor
es el padre de la Seguridad*

Edmund Burke

CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE RIESGOS HAZOP

Como se puede apreciar, el análisis HAZOP arrojó como resultado cuatro recomendaciones de clase A, de un total de 30 recomendaciones, las cuales deben de ser atendidas a la brevedad. Lo anterior no solo obedece a la clase de la recomendación, sino a que, de acatarse esta recomendación, podrían subsanarse recomendaciones de jerarquía menor, sobre todo de categoría B, que son de las que más se generaron.

Al ser acatadas las recomendaciones de mayor categoría, las recomendaciones de menor por lo regular tienden a ser, si no cubiertas, se toman en cuenta. Esto no debe de ser motivo para que, en caso de no ser así, las recomendaciones de menor categoría se dejen de lado, por insignificantes que parezcan. Y es que, las recomendaciones de clase C no deben de dejarse pasar por alto (para este análisis sólo fue generada una recomendación de este tipo), pues como se mencionó en el inicio de esta tesis, el creerse inmune a sucesos que parecen poco probables es lo que ocasiona que en la mayoría de los casos se ignoren las medidas correspondientes.

Las recomendaciones de clase B son las que más se generaron (se originaron veinticinco en total), lo cual se traduce en riesgos de probabilidad promedio, las cuales tienen un cierto margen de tiempo para ser acatadas.

Por último, acerca del Análisis HAZOP se puede concluir que es una arma poderosísima para prevenir accidentes, lo cual se debe en esencia a que, al ser realizado por equipos interdisciplinarios, se toman en cuenta muchos puntos de vista y perspectivas que serían difíciles de tomar en cuenta si se llevara a cabo por una sola persona o un grupo de profesionistas de la misma área.

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS.

En el análisis del árbol de fallas se ve que con las recomendaciones emitidas la probabilidad de ocurrencia no se mitiga por completo, pero si se reduce bastante, de una probabilidad de ocurrencia de 0.612 a una probabilidad de ocurrencia de $9.7 \text{ E-}2$, poco más de seis veces disminuida.



CAPÍTULO CUATRO: CONCLUSIONES.



Para reducirlo aún más o mitigar por completo los riesgos que se detectaron, habría que aplicar de nuevo el análisis de riesgos y buscar otras opciones a las recomendaciones. Sin embargo, de hacerse de esta forma, se puede llegar a un punto en el cual se encuentren eventos intermedios que pueden tener un origen múltiple y los cuales no serían fáciles de controlar, sobretodo para eventos que tienen que ver con el comportamiento humano.

De cualquier forma, el análisis de árbol de fallas es una técnica que, de ser aplicada correctamente, aporta mucho a la seguridad de cualquier planta, pues tiene como gran ventaja el llegar al fondo administrativo de los eventos indeseables. Lo anterior obedece a que esta técnica esta inculcando la política de "no buscar culpables, sino buscar causas", las cuales en su mayoría son de índole administrativo. Esto es de gran importancia ya que, la mayoría de las veces y en casi todas las industrias, no se toman en cuenta las causas administrativas o políticas las que generan actividades o situaciones de gran riesgo.

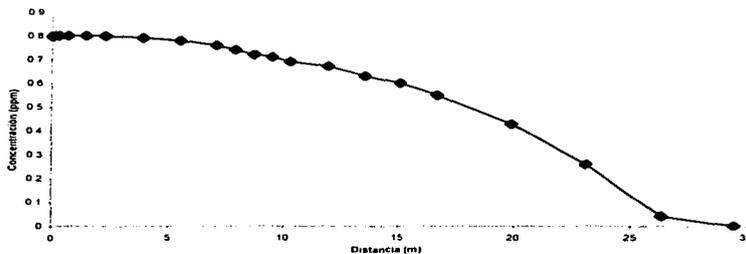
CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.

Para hacer alguna conclusión acerca del análisis de consecuencias debemos de estudiar antes algunos aspectos que fueron arrojados por el programa utilizado.

En primer lugar observemos la **Gráfica IV.1.** la cual nos muestra la variación que existe en la concentración del material emitido con respecto a la distancia a la cual se encuentra del origen de la emisión.

Como era de esperarse, la concentración de la emisión de material inflamable va disminuyendo con la distancia, lo cual es debido a la velocidad y temperatura del aire, ya que, de haberse elevado la temperatura ambiental o de haberse elevado la velocidad del viento, se hubiera favorecido la dispersión en el medio, y se hubiera originado una distancia de dispersión mayor. Otro factor que se ve involucrado en esta gráfica es el área por la cual se escapa la mezcla de propano-propileno, ya que si esta fuera mayor, también hubiera aumentando el área de dispersión.

El hecho de que el área de dispersión no sea muy grande no es garantía de que el material fugado no origine una nube explosiva, ya que esto se puede deber al efecto de atraque que se crean en algunas instalaciones. Para la planta desparafinadora, esto no sucede, pues como se ve en el plano AC-1, no existen equipos o muros que provoquen dicho efecto.



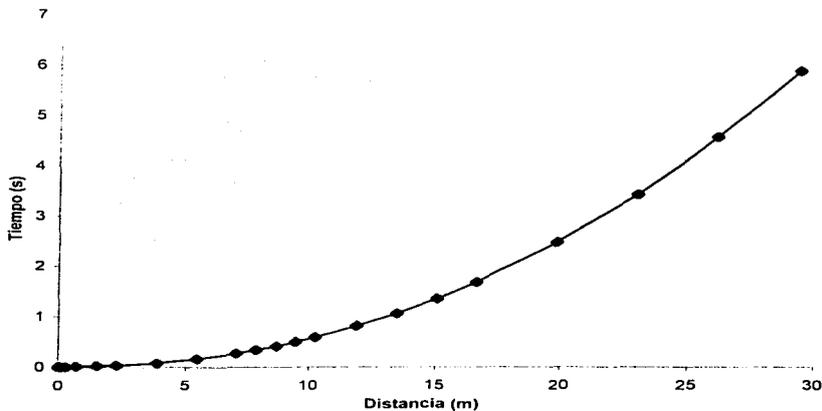
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfica IV.1. Concentración de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.

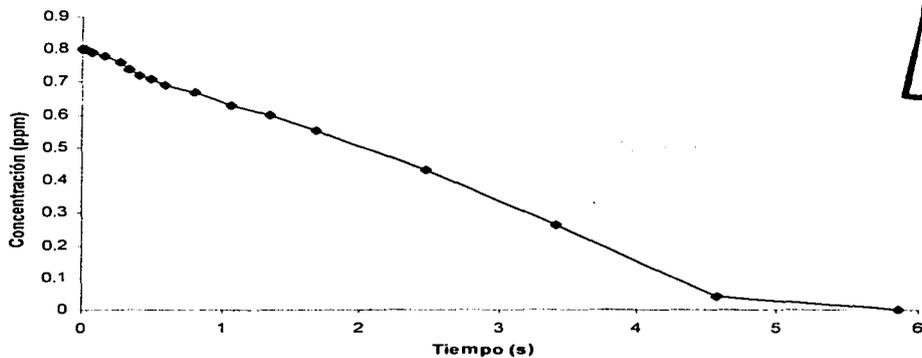
En las **Gráficas IV.2.** y **IV.3.** se aprecia la variación que existe en la distancia y concentración a diferentes tiempos. Se observa que la emisión alcanza una distancia de treinta metros en un lapso, relativamente corto, de seis segundos aproximadamente. Esto es probablemente debido a los mismos procesos por los cuales la emisión disminuye a lo largo de la distancia que recorre, es decir, la temperatura del medio ambiente y la velocidad de los vientos dominantes. Además, otra causa de que la dispersión se haga de forma rápida, es el poder de dispersión de los materiales emitidos (propano y propileno), en lo cual se ve involucrado directamente el peso molecular de dicha mezcla. Por otro lado, también se detecta una disminución muy grande en la concentración conforme se va alejando del punto de origen de la emisión, lo cual también es detectado en las **Gráficas IV.4.** y **IV.5.** donde llega un punto en el que la densidad de la emisión prácticamente no tiene variación y permanece constante.

Por último, con respecto a la explosión de la nube generada por la emisión de propano y propileno, se muestra en la **Gráfica IV.6.** las sobrepresiones producidas a distintos radios de distancia del inicio de la explosión, el cual, como se aprecia en el plano AC-1, no se encuentra en el sitio donde ocurre la fuga, sino metros más adelante, en dirección hacia donde es emitido el material expulsado y donde la concentración de dicha emisión es la mínima suficiente para poder iniciar la explosión (en este caso es de 1.08 E-4 ppm).

En la **Tabla IV.1.** se registran los posibles daños ocasionados por esta sobrepresión a diferentes aspectos de instalaciones y a personas.

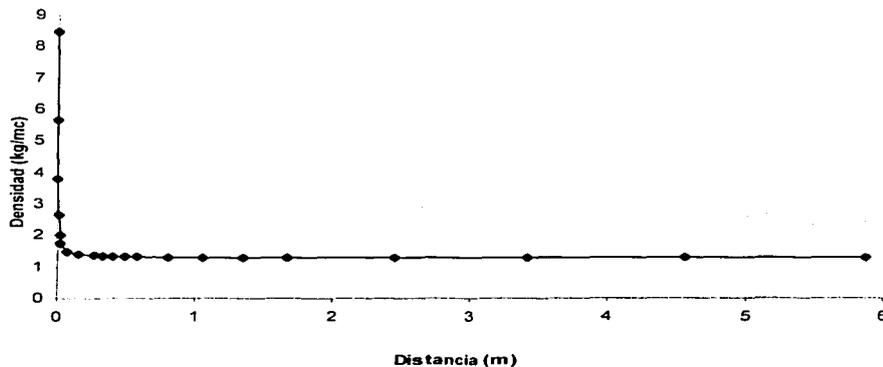


Gráfica IV.2. Tiempo desde el inicio de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.

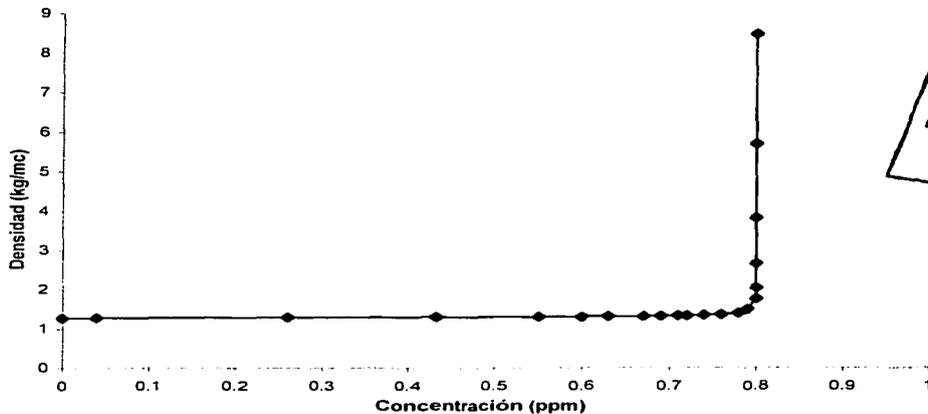


Gráfica IV.3. Concentración de la emisión vs. Tiempo transcurrido desde el inicio de la emisión.

TESIS CON
PALLA DE COQUE

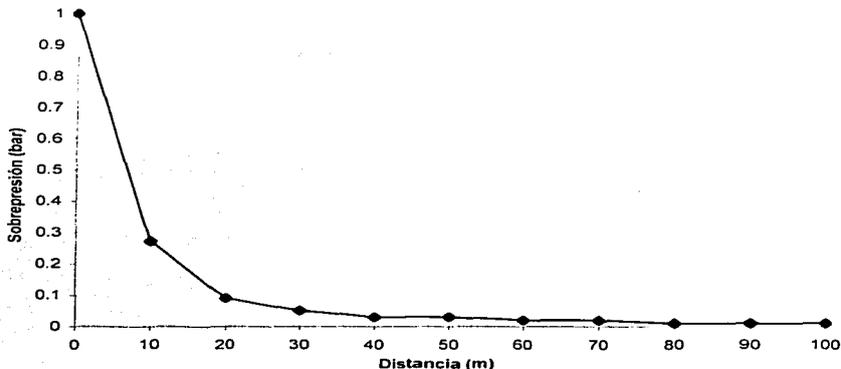


Gráfica IV.4. Densidad de la emisión vs. Distancia al origen de la emisión.



Gráfica IV.5. Densidad de la emisión vs. Concentración de la emisión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica IV.6. Sobrepresión de la explosión de la nube vs. Distancia al origen de la explosión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES GENERALES.

Las principales conclusiones de este trabajo son la posibilidad de promover las herramientas con las que se cuenta en la Seguridad Industrial, que si bien, muchas veces se omiten o simplemente no son utilizadas correctamente, tienen una gran ventaja: son preventivas en su mayoría. Estas herramientas también tienen la virtud de favorecer una política de: "no buscar culpables, sino buscar causas", las cuales muchas veces se encuentran en actitudes o políticas equivocadas y provocan que actividades o procedimientos rutinarios eleven ampliamente su nivel de riesgo. Y lo anterior no es una exageración, ya que la mayoría de los incidentes que existen se deben principalmente a la naturaleza humana, la cual es inherente a todos los que se encuentren laborando dentro de una planta de proceso. Es por eso que existe una necesidad muy grande por implementar políticas de aplicación de estas medidas preventivas, una conciencia que ya ha germinado en las empresas más grandes de nuestro país. Y todo lo anterior no es coincidencia, ya que estas técnicas tienen como principal objetivo el proteger el recurso más valioso de una industria, se trate de la que se trate: su personal.

Reginaldo Ramírez Maldonado



CAPÍTULO CUATRO: CONCLUSIONES.



Distancia (m)	SOBREPRESIÓN			EFECTOS EN PERSONAS	REFINERÍAS	PLANTAS DE PROCESO	OTROS EFECTOS
	bar	atm	psig				
0.00	1.00	1.00	14.6	1% de fatalidad por efectos de la explosión	Cuarto de control (construcción de concreto) y estructura de hierro: derrumbe de estructura de hierro.	Cuarto de control (techo de concreto): unidad destruida. Transformador eléctrico: unidad destruida. Ventilador: unidad destruida. Regulador de gas: controles dañados, carcaza y caja dañadas. Columna de extracción: la unidad se mueve de sus cimientos.	Probable destrucción de todos los edificios. Maquinas pesadas (3.5 Tons.) desplazadas de su ubicación original y dañadas severamente.
10.00	0.27	0.27	3.9	1% de probabilidad de ruptura de tímpano	Torre de regeneración: deformación de la columna. Edificio de mantenimiento: derrumbe de muros de tabique, deformación de la estructura. Tuberías: derrumbe de la estructura y rompimiento de líneas. Tanque de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos ó medio llenos, dependiendo de su capacidad.	Calentador: unidad destruida. Regenerador: marcos colapsados. Motor eléctrico: daño por proyección de partículas. Ventilador: carcaza y caja dañadas.	Edificios con estructuras ligeras demolidos completamente. Ruptura de tanques de almacenamiento tipo API 650.
20.00	0.09	0.09	1.31	Personas derribadas	Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de hierro): deformación de la estructura.	Cuarto de control (techo metálico): conectores dañados por colapso del techo. Cuarto de control (techo de concreto): conectores dañados por colapso del techo. Tanque de almacenamiento (techo cónico): colapso del techo.	Demolición parcial de edificios haciéndolos inhabitables.
30.00	0.05	0.05	0.73	Sin efectos	Idem.	Idem.	Daños menores a las estructuras de las casas.
50.00	0.03	0.03	0.43	Sin efectos	Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de hierro): deformación de la estructura.	Cuarto de control (techo metálico): ruptura de ventanas y medidores. Cuarto de control (techo de concreto): ruptura de ventanas y medidores. Torre de enfriamiento: fallas de mamparas.	Sacudidas en vidrios grandes. Daños ocasionales a marcos de ventanas.
70.00	0.02	0.02	0.29	Sin efectos	Sin efectos	Sin efectos	"Distancia Segura". 0.95% de probabilidades de no sufrir daños personales. Límite de proyectiles. Algún daño a techos de casas. 10% de vidrios rotos.
100.00	0.01	0.01	0.15	Sin efectos	Sin efectos	Sin efectos	Presión típica para ruptura de vidrios.

Tabla IV.1. Posibles efectos de la explosión de nube inflamable.

APÉNDICES





APÉNDICE A**GLOSARIO DE TÉRMINOS USADOS EN LAS TÉCNICAS PARA ANÁLISIS DE RIESGO**

Accidente: Significa cualquier acontecimiento no planeado que implica una desviación intolerable sobre las condiciones de diseño de un sistema causando daño a las personas, al equipo, a los materiales y al medio ambiente, y pueden ser accidentes menores o accidentes mayores.

Accidente menor: Es un acontecimiento no deseado que provoca daños leves a las personas, siendo necesaria la aplicación de primeros auxilios para que se incorporen nuevamente a sus actividades normales.

Accidente mayor: Cualquier suceso tal como una emisión, fuga, vertido, incendio o explosión que sea consecuencia de un desarrollo incontrolado de una actividad industrial y que pueda provocar una situación de gran riesgo, catástrofe o calamidad pública, inmediata o diferida, para las personas, para el medio ambiente y para los bienes propiedad de los accionistas, ya sea en el interior o en el exterior de las instalaciones, y en el que estén implicadas una o varias sustancias peligrosas.

Análisis de riesgos: Es una disciplina que combina la evaluación del proceso desde el punto de vista de la ingeniería con técnicas matemáticas que permiten realizar estimaciones de frecuencias / probabilidades y consecuencias de accidentes. Los resultados del análisis de riesgos pueden ser utilizados para la toma de decisiones (gerencia o administración de riesgos), ya sea mediante la jerarquización de las estrategias de reducción de riesgos o mediante la comparación con los niveles de riesgo fijados como objetivo en una determinada actividad.

Análisis de riesgos de procesos: Es un esfuerzo organizado para identificar, por medio de una serie de técnicas sistemáticas, las debilidades asociadas con el diseño u operación del proceso que podrían conducir a consecuencias indeseables (perjuicios personales o daños catastróficos a equipos) y determinar las medidas para controlar estos riesgos y eliminar o al menos mitigar sus consecuencias.

Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP): HAZOP (Hazard and Operability Analysis) quiere decir en castellano Análisis de Riesgos y Operabilidad. La palabra Riesgo viene de la palabra en inglés Risk y la palabra Peligro viene de la palabra en inglés Hazard. Con base a la



explicación anterior, HAZOP debería traducirse como Análisis de Peligro y Operabilidad, sin embargo nosotros usaremos la palabra riesgo en lugar de peligro como se ha venido haciendo. Es una herramienta sistemática usada por un equipo multidisciplinario, la cual usa una serie de palabras guía, que se aplican a cada parámetro del proceso seleccionado, para identificar, mediante la discusión propositiva y la generación de ideas: desviaciones de la intención de diseño de un sistema y sus procedimientos, las causas y consecuencias que las provocan y los sistemas de protección o mitigación de dichas causas y consecuencias, y que además, semicuantifica los riesgos, mediante la combinación de las y la gravedad, hace recomendaciones, las cuales clasifica y jerarquiza de acuerdo al nivel del riesgo encontrado, establece y jerarquiza las acciones para implementar las medidas correctivas determinadas por el equipo multidisciplinario.

Causa: Es la razón por la que se pueden producir desviaciones, es decir es lo que hace que un incidente o accidente ocurra. En general, podemos ubicarlas en errores que se ligan a las políticas de administración y errores humanos.

Circuito: Se denomina circuito a la sección de una planta de proceso específica, la cual esta bien delimitada y tiene características dentro del mismo proceso bien definidas por equipos y por segmentos de tubería.

Clase: Es la prioridad asignada a las acciones recomendadas sobre la base del nivel de riesgos encontrado basada en la matriz de riesgos.

Combustión: Es una reacción química en la que se libera energía a partir de la oxidación de un material. (Ver concepto del Apéndice C).

Consecuencia: Resultado de un evento no deseado, medido por sus efectos en los empleados, público en general, al medio ambiente, la producción y/o las instalaciones (equipo y maquinaria).

Desviación: Son variaciones no deseadas en la intención de diseño (flujo, presión, temperatura, reacción, nivel, etc.) que se descubren mediante la aplicación sistemática de las palabras guía.

Escenario potencial: Es la relación de sucesos que tienen el riesgo potencial con probabilidad elevada de causar pérdidas.



Evento de riesgo: Determinación de un evento hipotético así como de las zonas potencialmente afectada, en el cual se toma en consideración la ocurrencia de un accidente bajo condiciones determinadas, definido mediante modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales.

Frecuencia: Es el número de incidentes o sucesos indeseables que se han observado en un lapso de tiempo dentro de la planta.

Gravedad: Son las consecuencias de daño que puede tener un accidente dentro de la planta. Su nivel se asigna con ayuda del equipo multidisciplinario.

Incidente: Es el evento o combinación de eventos no planeados que se deben a errores humanos, fallas en los equipos y/o fenómenos naturales, que bajo circunstancias un poco diferentes, puede tener o no consecuencias para el personal, la población, el medio ambiente, la producción y/o las instalaciones (equipo y maquinaria).

Índice de riesgo: Es la combinación matemática entre la frecuencia y la gravedad: Índice de riesgo (pérdida / año) = Índice de frecuencia (accidente / año) x índice de gravedad (pérdida / accidente).

Medida correctiva: Es la acción que reduce la probabilidad del riesgo identificado o mitiga sus efectos cuando dicho riesgo se transforma en accidente.

Mitigación: Conjunto de acciones para disminuir las consecuencias de un accidente.

Modelo: Representación simplificada o esquemática de un evento de proceso con el propósito de facilitar su comprensión o análisis.

Nodo: Es la subdivisión de un sistema de proceso (circuito), este se puede identificar por el cambio de propiedades, en su origen comienzan nuevas propiedades del material y en su destino nuevamente hay un cambio de propiedades. Este debe ser lo suficientemente pequeño para que sea manejable y suficientemente grande para que sea significativo.

Palabra guía: Es aquella que indica la desviación parcial o total de la intención de la variable de proceso.

Parámetro: Es una manifestación física o química del proceso como el flujo, nivel, presión, temperatura, velocidad, composición, mezcla, punto de ignición, etc.



Peligro: Significa cualquier condición física ó química capaz de causar daños a las personas, al medio ambiente o a la propiedad. Serie de eventos no planeados que da como resultado una consecuencia no deseada.

Pérdida: Significa un derroche innecesario de recursos.

Probabilidad: Es la posibilidad matemática de que un evento ocurra y se expresa en fracciones entre 0 y 1. La absoluta imposibilidad es de 0 y la absoluta certeza es de 1.

Protecciones: Son todas las acciones o medidas que se toman dentro del sistema de estudio para mitigar o reducir la probabilidad de que ocurra un accidente o incidente.

Recomendaciones: Son todas las acciones o medidas que se pueden implementar para reducir o mitigar la probabilidad de que ocurra un accidente o incidente y que emanan del análisis de riesgos.

Riesgo: Significa la posibilidad de sufrir pérdidas o bien se puede considerar como una medida de pérdida económica o daño a las personas, expresada en función de la probabilidad del suceso y la magnitud de las consecuencias.

Salvaguarda: Es una protección para evitar o disminuir los efectos de algún acontecimiento no deseado.

**APÉNDICE B****MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL ÁRBOL DE FALLAS POR EL MÉTODO DE CONJUNTOS MÍNIMOS.**

George Boole (1815-1864) estableció que la mente humana tiene como mecanismo básico en la toma de decisiones, la asociación de elementos simples que adoptan dos posiciones: aceptación o negación, ilustrándolo en su libro "Teoría del pensamiento" y desarrollando un álgebra que tomo su nombre. El álgebra de Boole realiza sus dos operaciones con dos estados: verdadero y falso, hacia arriba o hacia abajo, alto o bajo, 1 o 0, actuando o no actuando, sucede o no sucede, etc., lo cual establece un sistema binario.

Los árboles de análisis de fallas se pueden reestructurar utilizando esta técnica también conocida como análisis de conjuntos mínimos (Minimal Cut Set Analysis) la cual consiste en eliminar los eventos básicos, secundarios e intermedios redundantes expresando las conexiones lógicas, Y y O, en términos del álgebra de Boole. Las reglas que se aplican con más frecuencia en el análisis de árbol de fallas se muestran a continuación:

REGLA	FORMA MATEMÁTICA
Commutativa:	$A \cdot B = B \cdot A$ $A + B = B + A$
Asociativa:	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ $A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributiva:	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$ $A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$
Idempotente	$A \cdot A = A$ $A + A = A$
De la Absorción:	$A \cdot (A + B) = A$ $A + (A \cdot B) = A$

Tabla B.1. Reglas booleanas de uso frecuente en el análisis de árbol de fallas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El procedimiento consiste en ordenar la estructura del árbol de fallas de forma que se pueda expresar en términos de ecuaciones algebraicas booleanas para reducir las ecuaciones, la reducción implica la introducción de los elementos inmediatamente relacionados con el evento que se esta describiendo en la ecuación algebraica así entonces, la ecuación final quedara en términos de eventos básicos que serán posteriormente



reestructurados en un nuevo árbol (árbol reducido) que es matemáticamente equivalente al primero.

Un árbol de fallas siempre puede describirse con una expresión equivalente del álgebra de Boole. Una parte importante del análisis FTA es la identificación de las agrupaciones de sucesos que pueden dar origen al evento culminante. Estas agrupaciones se denominan conjuntos de separación (cut sets), los conjuntos de separación identificados pueden manipularse con el fin de simplificarlos, reduciéndolos a una serie equivalente con un número menor de conjuntos que se denominan conjuntos mínimos (minimal cut sets). Un conjunto mínimo es aquel que no contiene otros conjuntos.

Ya obtenido el árbol por medio de los conjuntos mínimos se debe calcular la probabilidad de ocurrencia del evento culminante, las herramientas usadas para ello son las siguientes:

Teoría de Conjuntos:

Compuerta "O" $P(A) \cup P(B) = P(A) + P(B) - P(A) * P(B)$

Compuerta "Y" $P(A) \cap P(B) = P(A) * P(B)$

Cálculo de la Probabilidad:

$$P = 1 - e^{-ft}$$

Donde:

f = eventos / año

t = años

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En el caso de este cálculo la frecuencia de ocurrencia se puede obtener directamente de la experiencia vertida en el análisis HAZOP. Existe también otra forma de obtener la probabilidad de ocurrencia del evento esta se obtiene de la experiencia profesional vertida por diferentes grupos y empresas, así como la encontrada en diferentes fuentes bibliográficas, en general el común denominador en estos casos esta representada por la siguiente tendencia a la asignación de probabilidades:

Probabilidad	Equivalencia de la probabilidad
10^0	Inminente (Puede ocurrir en cualquier momento).
10^{-1}	Muy probable (Puede ocurrir en un año).
10^{-3}	Probable (Ha ocurrido en un año).
10^{-5}	Poco probable (Si no se ha presentado en 5 años).
10^{-7}	Improbable (No se ha presentado en 10 años).
10^{-9}	No hay posibilidad de que ocurra el riesgo.

Tabla B.2. Probabilidad y equivalencia en la Técnica del Árbol de Fallas.



APÉNDICE C

TÉRMINOS USADOS EN EL ESTUDIO DE ACCIDENTES CON FUEGO

Atraque: Obstaculización o dificultad del recipiente o local en que tiene lugar un proceso explosivo, Oposición a los gases producidos. Es función de la naturaleza del material del recipiente y de su hermetismo.

Bola de Fuego: Gases a muy alta temperatura que son generados de forma violenta, por una Nube Explosiva que tiene una concentración de vapores explosivos mas o menos homogénea.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion): Explosión en la que participa un líquido hirviente que se incorpora rápidamente a fase de vapor en expansión. Se presenta cuando el líquido se encuentra por arriba de la temperatura de ebullición, causando una generación repentina de vapor, que al expandirse puede alcanzar su temperatura de auto ignición.

También puede presentarse cuando la emisión de la fuga es grande y ha transcurrido un lapso de tiempo relativamente amplio entre el inicio de la fuga y el inicio de la ignición y en incendios de recipientes con sustancias comprimidas por alta presión, ya sea debajo de ellos o por su costado, lo cual ocasiona que, la presión aumente y si hay válvula de alivio, esta abra. Si la zona interior del contenedor que no se encuentra en contacto con el líquido (zona seca) no es enfriada (ya que los vapores generados se expanden y producen energía), podría causarse un calentamiento del material del que esta hecho el recipiente y posteriormente un debilitamiento térmico del mismo. Una vez fatigado el material, este se colapsará, lo cual provocará que gran parte del líquido que se encontraba contenido, se evapore, produciendo una nube que al mezclarse repentinamente con el aire se encenderá. Sus efectos térmicos por radiación son muy intensos y destructivos, ya que después que la mezcla de gases, combustible y comburente, es consumida de forma violenta, se genera una "Bola de fuego".

La sobrepresión que genera es muy pequeña.

Comburente: Materia o sustancia capaz de combinarse con un combustible para producir una mezcla que al encontrarse con una fuente de ignición comience una reacción de oxidación. Por lo general es oxígeno. En esta reacción el comburente hará el papel de receptor de electrones.



Combustible: Sustancia o material que, sin importar su estado físico (sólido, líquido o gaseoso), al generar vapores es capaz de ceder electrones en una reacción de oxidación, la cual sea iniciada por la presencia de un comburente y una fuente de ignición.

Combustibilidad: Propiedad necesaria para que una sustancia pueda combinarse con el oxígeno que se encuentra en la atmósfera generando grandes cantidades de energía a alta velocidad.

Combustión: Reacción Química en la que la energía de oxidación generada es debida a una sustancia o material en específico. Reacción de transferencia electrónica en la que, el combustible es un donador de electrones y el comburente un receptor. La cantidad de energía que es producida se origina del paso de electrones a enlaces de mayor estabilidad. La combustión sólo se lleva a cabo en vapores, en los líquidos no ni en sólidos. Para que un líquido se combustione debe evaporarse, y en el caso de los sólidos se tiene que pirrolizar.

Concentración de oxígeno mínimo para combustión: Concentración mínima necesaria para que se lleve a cabo la combustión de la mezcla de un comburente y una sustancia inflamable. Concentraciones menores a esta no genera energía suficiente como para que la reacción sea propagada por toda la mezcla. Principalmente es usada para visualizar las concentraciones necesarias del comburente (oxígeno) para iniciar una ignición, sin importar la cantidad de combustible que exista.

Dardo de Fuego (JET FIRE): Explosión seguida por una flama de forma y velocidad tal que, se genera a partir de la expansión súbita del vapor o neblina producida por un líquido que escapa a alta presión. También es conocido como "Chorro de Fuego".

Deflagración: Tipo de explosión en la cual el frente de ignición viaja a una velocidad menor a la del sonido, generando una sobrepresión máxima del orden de las 15 psi o menor y la duración de la fase positiva es de 20 a 100 ms. Proceso de superficie relativamente lento y netamente químico.

Detonación: Tipo de explosión en la cual el frente de ignición viaja a una velocidad mayor a la del sonido y en donde el calor de la reacción es transmitido por Ondas Explosivas. También pueden ser generadas por una transición de deflagración, ocasionada por un proceso que acelere el frente de reacción (por ejemplo en tuberías). Las presiones que se generan son más altas que las de las deflagraciones, y sus efectos son más devastadores.



Efecto Dominó: Propagación de incendios o explosiones debida principalmente a un evento bien identificado (por ejemplo, la explosión de una esfera de almacenamiento de una planta de gas licuado) y la cual no puede ser interrumpida de forma inmediata. Propagación de fuego en los alrededores de un accidente previo.

Explosión: Reacción de combustión de un gas o un vapor inflamable en la que el tiempo de ignición es tan corto que no da lugar a que el calor generado sea transmitido al medio ambiente por conductividad o por radiación, acumulándose en los gases producidos y llevándolos a un estado de energía cinética. Proceso a gran velocidad en el que un gas a alta presión tiende a equilibrarse con la presión de su entorno. El equilibrio se alcanza tan rápidamente que, la energía contenida en el gas a alta presión se disipa en forma de onda de choque. Aunque también es una reacción de oxidación, difiere de un incendio en el que la liberación de energía es de forma más lenta y menos violenta.

Cuando la nube de vapor producida por la fuga de una sustancia líquida inflamable es homogénea y tiene una concentración que se encuentra dentro del rango de inflamabilidad, al encontrarse con un punto de ignición, o si la temperatura es la adecuada, al autoincendiarse, se formará una flama de forma esférica conocida como "**Bola de fuego**", la cual se propagará por toda la nube. La flama en expansión generará ondas de sobrepresión en la mezcla que falta de reaccionar, las cuales tienen velocidades similares a la del sonido. Cuando la velocidad del frente de reacción es muy alta, se generará una superposición frontal de ondas, lo que producirán ondas de choque. Debida a que la reacción es muy exotérmica, se origina un incremento súbito de la temperatura y de la presión. La alta velocidad que se alcanza en la generación de "nuevas moléculas" (reacción química) que son mayores en número a los moléculas de reactivos, ocasiona que el aumento de presión local no se equilibre en forma lenta con la presión de los alrededores, algo que si sucede en un incendio.

Las Explosiones se clasifican en deflagraciones o detonaciones dependiendo de las velocidades relativas que tenga con respecto al sonido el frente de combustión de la mezcla que falta de consumir. Si es mayor, se considera una detonación.

Explosiones de Nubes de Vapor Confinadas: Ocurren cuando hay una combustión, descomposición térmica, reacción incontrolada, calentamiento extremo, sobrellenado o colisión, en recipientes de baja resistencia (edificios o silos) o en recipientes de proceso. Se originan principalmente en equipos o edificios que poseen características físicas que hacen que los vapores explosivos de algunas sustancias se "encierren". En caso de que exista un venteo adecuado, no habrá consecuencias que lamentar, sin embargo, si no lo hay, no se



APÉNDICES



dará oportunidad a la nube explosiva de que se disperse y los efectos de radiación, térmicos, sobrepresión y la generación de proyectiles serán abundantes. También se presenta cuando es provocada la ruptura de algún recipiente o tubería por el aumento de presión, debido a una explosión en su interior, la velocidad de aumento de presión es mayor que la velocidad de ruptura del recipiente, por lo que la presión efectiva de ruptura estará comprendida entre la presión a la cual se sobrepasa la resistencia mecánica del recipiente y la presión máxima obtenida, si la explosión queda totalmente confinada. En las **Tablas C.1., C.2a., C.2b y C.3.** se relaciona la presión ejercida por una explosión y el área donde se presenta. Muestran los distintos efectos y daños ocasionados por una explosión en relación con las refinerías y las plantas de proceso.

PRESIÓN (PSIG)	EFECTOS
0.02	Ruido Molesto.
0.04	Ruptura de vidrios por efectos de onda acústica.
0.15	Presión típica para ruptura de vidrios.
0.30	"Distancia Segura". 0.95% de probabilidades de no sufrir daños personales. Límite de proyectiles. Algún daño a techos de casas. 10% de vidrios rotos.
0.6 - 1.0	Sacudidas en vidrios grandes. Daños ocasionales a marcos de ventanas.
0.70	Daños menores a las estructuras de las casas.
1.0	Demolición parcial de edificios haciéndolos inhabitables.
2.0	Coflapso parcial de paredes y techos.
2.5	Demolición del 50% de los muros hechos a base de tabique.
3.0	Maquinaria pesada (1.5 Tons.) dentro de edificios sufren daños. Estructuras de acero distorsionadas y arrancadas desde los cimientos.
3 - 4	Edificios con estructuras ligeras demolidos completamente. Ruptura de tanques de almacenamiento tipo API 650.
5	Postes de suministro eléctrico arrancados.
6 - 7	Destrucción casi completa de casas.
7	Carros de ferrocarril volteados.
10	Vagones cargados de ferrocarril destruidos completamente.
10	Probable destrucción de todos los edificios. Maquinas pesadas (3.5 Tons.) desplazadas de su ubicación original y dañadas severamente.
300	Límite para la formación de un cráter.

Tabla C.1. Daños físicos producidos por explosiones.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



APÉNDICES



P (psig)	REFINERÍAS	PLANTAS DE PROCESO
0.5	<ul style="list-style-type: none">◇ Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): deformación de la estructura.	<ul style="list-style-type: none">◇ Cuarto de control (techo metálico): ruptura de ventanas y medidores.◇ Cuarto de control (techo de concreto): ruptura de ventanas y medidores.◇ Torre de enfriamiento: fallas de mamparas.
1.0	<ul style="list-style-type: none">◇ Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): deformación de la estructura.	<ul style="list-style-type: none">◇ Cuarto de control (techo metálico): conectores dañados por colapso del techo.◇ Cuarto de control (techo de concreto): conectores dañados por colapso del techo.◇ Tanque de almacenamiento (techo cónico): colapso del techo.
2.0	<ul style="list-style-type: none">◇ Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): deformación de la estructura.	<ul style="list-style-type: none">◇ Calentador: fractura de ladrillos.◇ Reactor químico: ruptura de ventanas y medidores.◇ Filtros: falla de paredes de concreto.
3.0	<ul style="list-style-type: none">◇ Edificio de mantenimiento: deformación de la estructura.	<ul style="list-style-type: none">◇ Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (50% llenado).◇ Cubículo de instrumentos: líneas de fuerza dañadas, controles dañados.◇ Regenerador: el equipo se mueve y las tuberías se rompen.◇ Tanque de almacenamiento (techo flotante): el equipo se levanta (50%).
5.0	<ul style="list-style-type: none">◇ Torre de regeneración: deformación de la columna.◇ Edificio de mantenimiento: derrumbe de muros de tabique, deformación de la estructura.◇ Tuberías: derrumbe de la estructura y rompimiento de líneas.◇ Tanque de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos ó medio llenos, dependiendo de su capacidad.	<ul style="list-style-type: none">◇ Calentador: unidad destruida.◇ Regenerador: marcos colapsados.◇ Motor eléctrico: daño por proyección de partículas.◇ Ventilador: carcasa y caja dañadas.

Tabla C.2a. Daños producidos por explosiones dentro de Refinerías y de plantas de proceso (Fuente: "Safety and Safety Codes", Vol. 1, y "Loss Prevention in the Process Industries", Vols.1-2).



APÉNDICES



P (psig)	REFINERÍAS	PLANTAS DE PROCESO
7.0	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Torre rectangular (estructura de concreto): derrumbe de la estructura y la torre. ❖ Torre de vacío octagonal (estructura de concreto): fractura de la estructura. ❖ Torre fraccionadora (montada sobre pedestal de concreto): caída de la torre. ❖ Torre de regeneración derrumbe de la estructura y la torre. ❖ Torre de vacío octagonal (estructura de concreto): fractura de la estructura.. ❖ Torre de vacío octagonal (estructura de acero): caída de la torre. ❖ Tanque de almacenamiento esférico: deformación de la estructura en tanques llenos. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Reactor catalítico: partes internas dañadas. ❖ Columna fraccionadora: unidad destruida.
10.0	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): derrumbe de estructura de fierro 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cuarto de control (techo de concreto): unidad destruida. ❖ Transformador eléctrico: unidad destruida. ❖ Ventilador: unidad destruida. ❖ Regulador de gas: controles dañados, carcaza y caja dañadas. ❖ Columna de extracción: la unidad se mueve de sus cimientos.
20.0	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cuarto de control (construcción de concreto) y estructura de fierro: derrumbe de estructura de fierro. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Tanque de almacenamiento (techo flotante): colapso del techo.
30.0	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cuarto de control (construcción de concreto) y estructura de fierro: derrumbe de estructura de fierro. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Motor eléctrico: la unidad se mueve de sus cimientos. ❖ Turbina de vapor: la unidad se mueve de sus cimientos.

Tabla C.2b. Daños producidos por explosiones dentro de Refinerías y de plantas de proceso (Fuente: "Safety and Safety Codes", Vol. I, y "Loss Prevention in the Process Industries", Vols.1-2).

BAR'S	EFECTOS EN PERSONAS
0.003	Ruido Fuerte (Aprox. 143 dB)
0.07	Personas derribadas
0.35	1% de probabilidad de ruptura de tímpano
0.43	50% de probabilidad de ruptura de tímpano
0.84	90% de probabilidad de ruptura de tímpano
1.00	1% de fatalidad por efectos de la explosión
1.40	50% de fatalidad por efectos de la explosión
1.75	90% de fatalidad por efectos de la explosión

TESIS CON FALLA DE ORDEN

Tabla C.3. Efectos de Sobrepresión en personas.



Explosión de Nubes de Vapor no Confinadas (UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion): Se caracteriza por ser generada debido a una fuga en fase líquida de un material inflamable, mantenido por encima de su punto de ebullición a la presión atmosférica. La disminución repentina de presión se acompaña de una evaporación súbita (flash) de una fracción del líquido. La cantidad que se evapora es conocida como Fracción Adiabática Teórica Vaporizada (FATV)

Este fenómeno es muy similar a las explosiones generadas por fugas donde existe líquido y vapor, sin embargo aquí, el líquido se encuentra a una temperatura menor que la de ebullición, evitando así que la explosión sea de mayor magnitud.

Las condiciones posibles de las que depende son: (1) la reactividad del material involucrado, (2) algún factor que propicie la eficiente mezcla entre el vapor y el aire, específicamente con el oxígeno y (3) el tiempo transcurrido entre el inicio del escape y el inicio de la ignición. En varios estudios acerca de los materiales que han producido UVCE's se ha determinado que los vapores de productos inflamables que cuentan en su estructura molecular de dos a seis átomos de carbono han sido responsables de casi todos los casos de procesos explosivos, con preponderancia de los hidrocarburos con tres y cuatro átomos de carbono.

Explosión Física: Es aquella que sólo se presenta la fase gaseosa, sólo se forman ondas de choque o la formación de proyectiles, sin que se produzca la ignición de la mezcla. Explosión que se origina sólo por elementos físicos donde no intervienen de forma directa procesos químicos: ruptura de recipientes llenos de gases a alta presión, calderas de vapor, etc.

Explosión Térmica: Son resultado de las reacciones químicas de tipo exotérmicas y transcurren bajo condiciones de confinamiento, en los que se carece de medios apropiados para disipar el calor de reacción.

Explosión Química: Son aquellas en donde la alta presión de los gases tiene por origen a una reacción química. En estas explosiones el gas o vapor combustible debe formar una mezcla con el aire dentro del intervalo de inflamabilidad y que tenga un lugar de ignición. A partir de aquí puede ocurrir una explosión de nube de vapor no confinada o un incendio de evaporación súbita (flash).

Explosivo: Sustancia o mezcla capaz de reaccionar exotérmicamente en un tiempo brevísimo y con una eficiencia de reacción muy alta que produce en su mayoría gases, los



cuales acumulan gran parte del calor generado, adquiriendo energía cinética a nivel molecular, capaz de ser transformada en trabajo mecánico. Estas sustancias se clasifican en propulsores (por ejemplo la pólvora) y en rompedores o explosivos (ciertas clases de materiales plásticos).

Flash: Producción de vapor a partir de un líquido contenido a presión que es expuesto repentinamente a una presión menor a la de su confinamiento.

Fracción Adiabática Teórica Vaporizada (FATV): Fracción de un líquido que se ha fugado y que, por una disminución repentina de presión, se evapora. Se ve afectada principalmente por dos relaciones, depende de (1) la diferencia que exista entre las temperaturas del líquido antes de la fuga y su temperatura de ebullición, a la presión atmosférica y (2) la relación entre el calor específico del líquido y su calor latente de evaporación. Esta cantidad varía de 0 (cuando la diferencia es de cero) a 100% (cuando la temperatura del líquido es cercana a la temperatura y presión críticas).

Fuente o Punto de Ignición: Elemento que provee de la energía mínima necesaria para que comience la combustión de la mezcla combustible y comburente. Las más usuales dentro de la industria son superficies calientes, flamas de quemadores de desfogue, instalaciones y equipos eléctricos, "puntos calientes" (cigarrillos, flamas de encendedores y cerillos); etc.

Incendio: Es la combustión, de forma más o menos lenta, de grandes cantidades de un material, y por ser de forma incontrolada, ocasiona grandes pérdidas, ya sean humanas, materiales o ambas.

Incendios de gases o vapores en fuga: Su comportamiento es muy diferente al de los vapores que son originados por líquidos, pues al salir al ambiente, y debido a que generalmente se encuentran a presiones mucho mayores que la atmosférica, se genera turbulencia en la zona cercana a la fuga, lo cual ocasiona que el material fugado se mezcle con el aire. Si el gas en cuestión es ligero (con peso molecular menor o similar al del aire) la mezcla se elevará y se extenderá debido a la turbulencia. Para gases más pesados (como lo es el caso de los hidrocarburos), la mezcla se dispersará a nivel del suelo.

En caso de que se encuentre un punto de ignición se producirá una flama (algo muy común cuando la fuga es por algún orificio pequeño es que la ignición principia a los pocos segundos de comenzar la fuga). Cabe mencionar que en los incendios, en el proceso de generación de "nuevas moléculas" (reacción química), la velocidad de reacción da el



suficiente tiempo para que la presión de la atmósfera equilibre el aumento de la presión que se genere por la reacción.

Incendios de líquidos fugados a alta presión: La fuga de un líquido a alta presión ocasiona que dicho líquido salga en forma de chorro, neblina o se atomice (formar gotas de dimensiones muy diminutas), lo cual, si encuentra en su camino una fuente de ignición, produce un **JET FIRE**. Estos incendios suelen ser muy intensos y ocasionan llamas de gran longitud y de comportamiento incierto, lo cual puede materializarse en un evento de **Efecto Dominó**.

Incendios de Superficies Líquidas (POOL FIRES): También se le conoce como "Albercas o charcas en llamas". Los incendios de líquidos tienen como causas esenciales fugas en uniones soldadas, empaques de bombas, rupturas de tuberías y contenedores, descargas deliberadas de equipos, tuberías y contenedores, etc. Debido a que ningún líquido arde, este tipo de incendios se debe a los vapores generados por el calor en el líquido que ha fugado.

Inflamabilidad: Es la mayor o menor facilidad con que una sustancia puede arder en el aire o en algún otro gas que puede servir como comburente. Propiedad de algunas sustancias para producir, a temperatura ambiente, una cantidad de vapores suficiente para generar a una nube que contenga una mezcla de ella misma con el aire. Cabe señalar que la palabra Inflamabilidad proviene del latín *In*: dentro de, y *flamme*: arder o encender.

Límite de Inflamabilidad: Límite que indica el rango de concentración del combustible, normalmente en porcentaje volumétrico. Dentro del rango de esta concentración la mezcla combustible-comburente se puede quemar. Debajo de la Fracción Adiabática Teórica Vaporizada (FATV) la concentración no es la suficiente como para que la combustión sea propagada en toda la mezcla. Si la concentración es mayor al **Límite Superior de Inflamabilidad (LSF)** la relación combustible y comburente es muy alta, por lo que tampoco habrá reacción de propagación, debido al exceso de combustible. Esto refleja como impacta la presión en este parámetro, pues al aumentar la presión, el LSF también crece. Si la presión alcanza un valor menor a 5 kPa, la flama no se propaga con facilidad.

Otro de los factores ambientales que impactan en estos rangos es la temperatura atmosférica, la cual al incrementarse o disminuir, aumenta o reduce el rango de **inflamabilidad** respectivamente.

Para establecer los límites seguros se considera una concentración equivalente a $\frac{1}{2}$ L.I.I.



Onda Explosiva: Serie de etapas que deduce que una detonación se lleva a cabo por una explosión en la cual, las primeras moléculas gasificadas alcanzan una velocidad tan alta que no ceden por conductividad el calor que adquirieron al explosivo aún no gasificado, sino por impacto que lo deforma y lo calienta induciéndolo a que emita nuevos gases, y así, por choques que producen calor, calor que descompone al explosivo en productos que vuelven a chocar, se va transmitiendo el proceso. Estos choques entre moléculas afectan a toda la masa, en lugar de ser un fenómeno solo superficial, y la reacción química avanza como si fuera remolcada por fenómenos mecánicos.

Presión Crítica: Presión requerida para obtener la licuefacción de un gas a cierta temperatura (temperatura crítica). Presión correspondiente a la cual las fases líquida y gaseosa de una sustancia tienen densidades muy similares.

Nube Explosiva: Emisión masiva de vapores inflamables de un líquido, que de combinarse con un comburente y la presencia de una fuente de ignición o de conjuntarse las condiciones de auto ignición, puede ocasionar una explosión.

Sobrepresión: Aumento de presión en la presión atmosférica, generado por una explosión. Dependiendo de la magnitud de esta presión extra, se presentarán daños en personas, instalaciones o equipos (ver **Tabla C.2.**).

Temperatura Crítica: Temperatura máxima a la que una sustancia puede existir como líquido.

Temperatura de Inflamación Instantánea (FLASH POINT): Temperatura mínima necesaria que ocasiona que una sustancia desprenda una cantidad suficiente de vapores para mantener una combustión en presencia de una fuente de ignición. Sólo se aplica a líquidos estables en aire o a sólidos que se vaporizan antes de quemarse.

Ruptura de Recipientes Presurizados: La ruptura de un recipiente presurizado se puede deber a las causas siguientes:

- Falta del equipo de regulación y alivio de presión.
- Defectos de diseño o de construcción.
- Reducción del espesor de pared debido a corrosión, erosión o ataque químico.
- Reducción de la resistencia por calentamiento o sobre-enfriamiento.



APÉNDICE D

HOJAS DE SEGURIDAD DE SUSTANCIAS

ESPECIFICACIONES PARA LA METIL ETIL CETONA

NOMBRE QUÍMICO		BUTANONA		SINÓNIMOS		2-BUTANONA, METIL-ETIL CETONA Y MEK		FÓRMULA QUÍMICA		CH ₃ COC ₂ H ₅	
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:											
P.M.	72.1	Densidad relativa de vapor (aire=1):	2.41	Punto de ebullición:	80 °C	Solubilidad en agua:	29 g/100ml a 20 °C	Presión de vapor:	10.5 KPa a 20° C		
Aspecto y color:		Líquido Incoloro.			Olor:		Característico, Su olor recuerda al de la Acetona.				
ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD:											
REACTIVIDAD:		Reacciona violentamente con oxidantes fuertes y ácidos inorgánicos, originando peligro de incendio.									
		Fuentes de calor e ignición.									
		Oxidantes y ácidos fuertes.									
		Por reacción con el ozono y el agua oxigenada da peróxidos, productos inestables y peligrosos.									
INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA:											
Contacto con la piel		PUEDE ABSORBERSE. Por lo tanto puede dar síntomas de tos, vértigo, embotamiento, dolor de cabeza, náuseas, jadeo, pérdida del conocimiento, vómitos, calambres. El líquido desengrasa la piel.									
Contacto con los ojos		Enrojecimiento, dolor.									
Inhalación		Tos, vértigo, embotamiento, dolor de cabeza, náuseas, jadeo, pérdida del conocimiento, vómitos									
Ingestión		Calambres abdominales, confusión (para mayor información, véase Inhalación).									
Riesgos de incendio y explosión:											
Incendio:		El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo, posible ignición en punto distante.									
Explosión:		Las mezclas vapor/ aire son explosivas.									
Puntos de inflamación:		-9° C		Temperatura de autoignición:				505° C			
Equipo de Protección Personal:				Manipulación y almacenamiento:							
Protección respiratoria: Sí Protección de manos: Sí Protección de ojos: Sí Protección del cuerpo: Sí Instalaciones de seguridad: Lavaojos.				Condiciones de manipuleo: Manipuleario lejos de fuentes de ignición, Mantener la ventilación adecuada. Evitar todo tipo de contacto. NO producir chispas y NO fumar. Usar sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilice herramientas manuales no generadoras de chispas. Condiciones de almacenamiento: Almacenaje a prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes y ácidos fuertes. Mantener en lugar fresco y bien cerrado.							



APÉNDICES



<p>Medidas a tomar en caso de derrames y/o fuga:</p> <p>Precauciones personales: Protección personal completa, incluyendo equipo autónomo de respiración. Colocar todo el equipo de operativo a tierra para evitar chispas.</p> <p>Precauciones ambientales: NO verterlo al alcantarillado.</p> <p>Métodos de limpieza: Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. Las trazas finales deben ser dispersadas con grandes volúmenes de agua.</p>	<p style="text-align: center;">Medidas a tomar en caso de contacto con el producto - Primeros Auxilios</p> <p>En general: En todos los casos luego de aplicar los primeros auxilios, derivar al médico.</p> <p>Contacto con la piel: Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse.</p> <p>Contacto con los ojos: Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.</p> <p>Inhalación: Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.</p> <p>Ingestión: Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante y proporcionar asistencia médica.</p>
<p style="text-align: center;">Medidas a tomar en caso de incendio y explosión</p>	<p style="text-align: center;">Medidas a tomar para la disposición final de residuos</p>
<p>Medidas de extinción apropiadas: Utilizar polvo químico, espuma o dióxido de carbono.</p> <p>Medidas de extinción inadecuadas: No utilizar agua en chorro para evitar que el líquido se disperse o desparame.</p> <p>Productos de descomposición: Al quemarse genera gases tóxicos e inflamables.</p> <p>Equipos de protección personal especiales: Trajes aluminados y equipos autónomos de respiración.</p> <p>Instrucciones especiales para combatir el fuego: Mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.</p>	<p>Los restos de producto químico deberían eliminarse por incineración o mediante cualquier otro medio de acuerdo a la legislación local.</p> <p>No verter en ningún sistema de cloacas, sobre el piso o extensión de agua.</p>

ESPECIFICACIONES PARA EL TOLUENO

NOMBRE QUÍMICO	TOLUENO	SINÓNIMOS	METILBENZENO, FENILMETANOL Y TOLUOL	FÓRMULA QUÍMICA	C ₆ H ₅ CH ₃ /C ₇ H ₈
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:					
P.M.	92.1	Densidad relativa de vapor (aire=1):	2.41	Punto de ebullición:	111 °C
Aspecto y color:	Líquido Incoloro.			Olor:	Aromático característico (agradable)
REACTIVIDAD:	Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.				
Condiciones que favorecen:	Fuentes de calor e ignición.				
Condiciones que evitan:	Ácido nítrico: reacción vigorosa. Ácido nítrico + ácido sulfúrico: posible descomposición violenta. Oxidantes fuertes: peligro de fuego y explosión. Plásticos, gomas y recubrimientos: pueden ser atacados. Ácido sulfúrico: reacción exotérmica.				

TESIS CON
PARTICIPA DE QUÍMICA



APÉNDICES



Producto de descomposición:	<i>Por altas temperaturas: puede liberar humos acres y vapores irritantes.</i>		
INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA:			
Contacto con la piel	<i>Irritante, los vapores pueden causar deshidratación. Puede causar dermatitis</i>		
Contacto con los ojos	<i>Irritación y quemadura de córnea si no se remueve rápidamente. Puede causar conjuntivitis.</i>		
Inhalación	<i>Irritante, narcótico y neurotóxico. Puede causar la irritación de la membrana mucosa, vómito, insomnio, anorexia, pérdida momentánea de memoria.</i>		
Ingestión	<i>Narcótico, puede causar sensación de quemadura y espasmos abdominales.</i>		
Riesgos de incendio y explosión:			
Incendio:	<i>Altamente inflamable. El vapor es más denso que el aire y puede extenderse al ras del suelo; posible ignición en punto distante con resultado del flujo, agitación, etc. Se pueden generar cargas electrostáticas.</i>		
Explosión:	<i>Las mezclas vapor/ aire son explosivas.</i>		
Puntos de inflamación:	<i>4.4º C (vaso cerrado)</i>	Temperatura de autoignición:	<i>480 ° C</i>
Equipo de Protección Personal:		Manipulación y almacenamiento:	
<i>Protección respiratoria: Sí Protección de manos: Sí Protección de ojos: Sí Protección del cuerpo: Sí Instalaciones de seguridad: Sí</i>		<i>Condiciones de manipuleo: Usar herramientas antichispas y equipos de protección. Evitar el contacto con goma. Usar líneas de acero dulce y tuberías de polipropileno, acero dulce o acero inoxidable. Evitar las flamas, NO producir chispas, NO fumar, comer ni beber durante el trabajo. Condiciones de almacenamiento: A prueba de incendio. Alejado de fuentes de ignición. Separado de oxidantes fuertes.</i>	
Medidas a tomar en caso de derrames y/o fuga:		Medidas a tomar en caso de contacto con el producto - Primeros Auxilios	
<i>Precauciones personales: Equipo autónomo de respiración. Precauciones ambientales: NO verterlo al alcantarillado. Métodos de limpieza: Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.</i>		<i>En general: En todos los casos luego de aplicar los primeros auxilios derivar al médico.. Contacto con la piel: Quitar las ropas contaminadas. Lavar con abundante agua y jabón. Remover la indumentaria contaminada y proporcionar asistencia médica Contacto con los ojos: Lavar con abundante agua durante varios minutos (quitar lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica. Inhalación: Sacar del área contaminada inmediatamente y exponer al aire fresco, si es necesario dar respiración artificial y proporcionar asistencia médica. Ingestión: Enjuagar la boca, dar a beber una pastilla de carbón activado y agua. NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.</i>	
Medidas a tomar en caso de incendio y explosión		Medidas a tomar para la disposición final de residuos	
<i>Medidas de extinción apropiadas: Espuma, Dióxido de Carbono, polvos químicos. Si es posible mover el contenedor fuera del área de fuego y enfriar con agua. Medidas de extinción inadecuadas: No utilizar agua en chorro sino en forma de niebla. Productos de descomposición: Por las altas temperaturas puede liberar humos acre y vapores irritantes. Equipos de protección personal especiales:</i>		<i>Los restos de producto químico deberían eliminarse por incineración o mediante cualquier otro medio de acuerdo a la legislación local. El envase contaminado, debe tratarse como el propio residuos químicos. No verter en ningún sistema de cloacas sobre el piso o extensión de agua.</i>	

TESIS CON
PARTICIPACIÓN DE



Trajes de protección personal completa y equipos de respiración autónoma. Instrucciones especiales para combatir el fuego: Mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

Estas son técnicas de apoyo, en la cual se busca recopilar la mayor cantidad de información de las sustancias que existen utilizadas en la industria química. En la **Tabla D.1.** se presentan las principales Hojas de Seguridad, con sus respectivas siglas y sus características.

NOMBRE	SIGLAS	CARACTERÍSTICAS
Chemical Abstracts Service	<u>CAS</u>	Número asignado por la Chemical Abstracts.
United Nations	<u>UN</u>	Número asignado por la ONU a las sustancias químicas peligrosas. Usado internacionalmente en la transportación terrestre, ferroviaria y aérea.
Hazard Chemical Code	<u>HAZCHEM Code</u>	Código utilizado por los servicios de emergencia del Reino Unido para la clasificación de sustancias peligrosas que se transportan por vía terrestre.
National Fire Protection Association	<u>NFPA</u>	Es la asociación que creó el rombo de colores para representar el rombo de colores que ha sido ampliamente difundido. Cada sección de este rombo representa un riesgo en particular de las sustancias químicas asignándole una puntuación que va de 0 a 4.

Tabla D.1. Principales Hojas de Seguridad.

También existe en Estados Unidos de Norteamérica una gran variedad de códigos, en los cuales cada sustancia tiene un número para su identificación:

- Standard Transportation Commodity Code (STCC)
- Registry of Toxic Effects of Chemicals (RTECS)
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
- International Civic Aviation Organization (ICAO)
- International Air Transportation Agency (IATA)
- International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG Code)

En este último código, las sustancias son clasificadas en nueve categorías de peligrosidad: Explosivos (clase 1), Gases comprimidos (clase 2), Líquidos inflamables (clase 3), Sólidos inflamables y sustancias de combustión espontánea (clase 4), Sustancias oxidantes (clase 5).





APÉNDICES



Sustancias venenosas (clase 6), Materiales radiactivos (clase 7), Materiales corrosivos (clase 8) y Sustancias misceláneas (clase 9). También, este código es muy utilizado en otras organizaciones como el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT, por sus siglas en inglés), el Centro Canadense de Emergencias en Transportación (CANUTEC, por sus siglas en inglés) y aquí en México, por el CETIQ (Centro de Emergencias en Transportación para la Industria Química).

NÚMERO	SALUD (AZUL)	INFLAMABILIDAD BASÁNDOSE EN EL FLASH POINT (ROJO)	REACTIVIDAD (AMARILLO)
0			Estable
1			Inestable si es calentado
2			Cambio químico violento
3			Detona al ser calentado ligeramente o golpeado
4			Detonante

Figura D.2. Significado de los valores empleados en el Diamante de la NFPA.

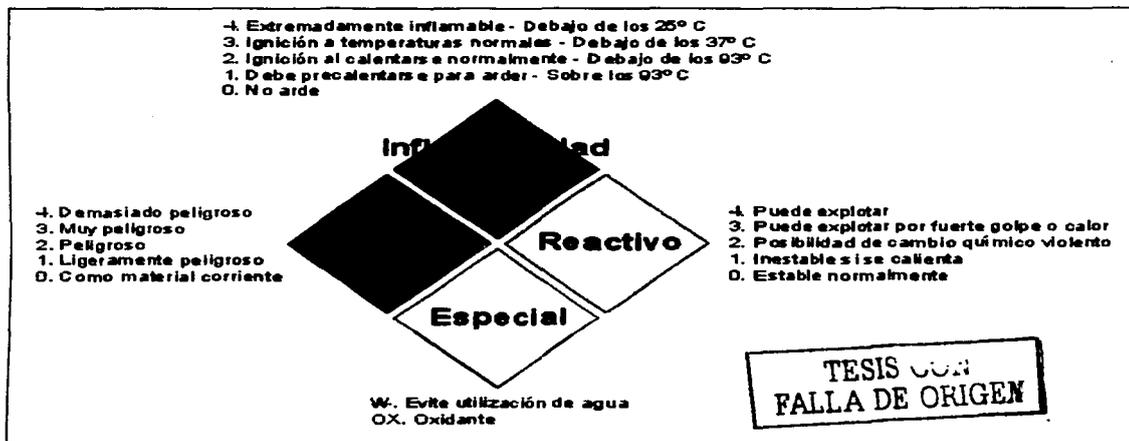


Figura D.1. Diamante de Señalización de la NFPA.

Existen también documentos emanados por el Gobierno estadounidense para el control de productos peligrosos:

- Environmental Protection Agency (EPA)



APÉNDICES



- Extremely Hazard Substance (EHS), definida por la EPA bajo el Título III de SARA.
- Superfund Amendment Reauthorization Act (SARA)
- Comprehensive Environmental Recovery Compensation Liability Act (CERCLA)
- Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)

En la **Tabla D.3.** se presentan algunas hojas de Seguridad para niveles de Toxicidad.



NOMBRE	SIGLAS	CARACTERÍSTICAS
<i>Reportable Quantity</i>	<u>RQ</u>	Cantidad de sustancia que excede a la de la EPA.
<i>Threshold Planning Quantity</i>	<u>TPQ</u>	Cantidad designada por cada producto químico en la lista EHS de EPA.
<i>Threshold Limit Values (E.U.A.)</i>	<u>TLV</u>	Límites de concentración del producto bajo el cual, todos los trabajadores pueden ser expuestos todos los días laborables al agente químico sin presentar efectos adversos
<i>Threshold Limit Values - Time Weighted Concentration Age (E.U.A.)</i>	<u>TLV - TWA</u>	Concentración promedio para una jornada normal de 8 hrs. al día y 40 horas a la semana, a la cual la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos al agente químico sin presentar efectos adversos.
<i>Threshold Limit Values - Short Term Exposure Limit (E.U.A.)</i>	<u>TLV - STEL</u>	Concentración que no debe de exceder se en 15 minutos de una jornada de trabajo.
<i>Threshold Limit Values - Ceiling Limit (E.U.A.)</i>	<u>TLV - C</u>	Concentración que no debe de ser excedida durante una jornada de trabajo.
<i>Maximin Arbeitsplatz Konzentration (Alemania)</i>	<u>MAK</u>	Concentración máxima permisible presente en le aire dentro del área de trabajo y a la cual no hay daño al trabajador durante una jornada de 8 horas diarias y 40 horas por semana.
<i>Valeurs des Moyennes d'Exposition (Francia)</i>	<u>VME</u>	Equivalente a TLV - TWA.
<i>Valeurs Limites d'Exposition (Francia)</i>	<u>VLE</u>	Equivalente a TLV - STEL.
<i>Lowest Published Lethal Concentration</i>	<u>LCLO</u>	Concentración letal mínima publicada
<i>Lowest Published Lethal Doses</i>	<u>LDLO</u>	Dosis letal mínima publicada
<i>Letal Concentration 50</i>	<u>LC50</u>	Concentración por la cual se provoca la muerte del 50% de una población de animales sometidos a experimentación.
<i>Letal Doses 50</i>	<u>LD50</u>	Dosis por la cual se provoca la muerte del 50% de una población de animales sometidos a experimentación.
<i>Lower Explosive Limit</i>	<u>LEL</u>	Concentración mínima (en % de volumen) del vapor en el aire, bajo la cual una flama no es propogada cuando esta presente una fuente de ignición.
<i>Upper Explosive Limit</i>	<u>UEL</u>	Concentración máxima (en % de volumen) en el aire, bajo la cual una flama no es propogada.

Tabla D.3. Hojas de Seguridad Para niveles de Toxicidad y Explosividad



BIBLIOGRAFÍA





BIBLIOGRAFÍA



1. **Curso de Administración Integral de Riesgos (AIR)**,
 2. UNAM, Facultad de Química, 2001.
3. Faust S. Alan, "**PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS**", Compañía Editorial Continental, México D.F. 1998.
 4. Austin T. George, "**Manual de Procesos Químicos en la Industria**", McGraw Hill Interamericana de México, 1995.
 5. **Curso: "Técnicas de Investigación de Incidentes en los Procesos Químicos"**, UNAM, facultad de Química, 2002.
 6. **Taller de Análisis de Riesgos y Operabilidad**, UNAM-Facultad de Química (1999).
 7. Greene W. Richard, **Compresores Selección Uso y Mantenimiento**, McGraw Hill Interamericana de México, 1995.
 8. **HOJAS DE SEGURIDAD DE REACTIVOS (0)**, Coordinación de Seguridad, Prevención y Protección Civil, Facultad de Química, UNAM.
9. A.I.Ch.E. **DOW'S FIRE & EXPLOSION INDEX HAZARD CLASSIFICATION GUIDE**, American Institute of Chemical Engineers, 1994.
10. Noll K.E., Miller T.L., "**Air Monitoring Survey Design**", Ann Arbor Science, Michigan, 1977.
11. O.I.E.A., "**Dispersión Atmosférica en Relación con el Emplazamiento de Centrales Nucleares: Guía de Seguridad**", STI/PUB/549, Viena, 1982.
12. Turner D.B., "**Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates**", Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, Research Triangle Park, North Carolina, 1970.
13. Pasquill F., "**Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources**", Ellis Horwood Lt., 2nd. Edition, New York, 1974.
14. Perkins H.C., "**Air Pollution**", McGraw Hill KogaLusha Ltd., Tokio, 1974.
15. U.S. Nuclear Regulatory Commision, "**Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water Cooled Reactors**", Regulatory Guide I.III., U.S.A., July 1977.
16. Ludwig F.L., Gasiorek L.S., Ruff R.E., "**Simplification of a Gaussian Puff Model for Real-Time Minicomputer Use**", Atmos. Environ., Vol. II, pp. 431-436, 1977.



BIBLIOGRAFÍA



17. Factory Mutual Systems, "**Handbook of Industrial Loss Prevention**", 2nd. Edition, McGraw Hill, New York, 1967.
18. NIOSH/OSHA, "**Pocket Guide to Chemical Hazards**", U.S. Dept. of Health and Human Services-U.S. Dept. of Labor, U.S.A., September 1978.
19. Perry R.H., Chilton C.H., "**Chemical Engineer's Handbook**", Fifth Edition, McGraw Hill KogaLusha Ltd., Tokio, 1973.
20. Reid R.C., Sherwood T.K., "**Propiedades de los Gases y Líquidos: Su estimación y Correlación**", Primera Edición en Español, U.T.E.H.A., 1968.
21. Devenport S.A., "**A Survey of Vapour Cloud Incidents**", CEP, September 1977, pp. 54-62, 1977.
22. Santamaria Ramiro, J.M. "**Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química**", Fundación MAPFRE, España, 1994.
23. Norma Oficial Mexicana 114. **Sistemas para la Identificación y Comunicación de Riesgos por Sustancias Químicas en los Centros de Trabajo**. 1994.
24. Butron S. Arturo. **Explosiones Debidas a Nubes de Vapor no Confinadas (UVCE)**. Revista de la Asociación Mexicana de Seguridad e Higiene. 1995.
25. Butron S. Arturo. **PRINCIPIOS GENERALES DE LA INGENIERÍA DE SEGURIDAD**. Revista de la Asociación Mexicana de Seguridad e Higiene. 1993.
26. National Fire Protection Association (NFPA). **Fire Hazards Properties of Flammable Liquids, Gases and Volatile Solids**. Standard 325 M Quincy Massachussets 1990.
27. American Institute Chemical Engineer. **Curso de Análisis de Riesgos y Operabilidad Hazop**. Aiche. (1998).