

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

“EVALUACIÓN PARA EL CONTROL Y REDUCCIÓN DE RIESGOS EN
UNA PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA
P R E S E N T A:
COLUMBA JULIETA LÓPEZ RAMÍREZ



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

México, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



JURADO ASIGNADO:

Presidente	Prof. José Antonio Ortiz Ramírez
Vocal	Prof. Juan Mario Morales Cabrera
Secretario	Prof. Modesto Javier Cruz Gómez
Primer Suplente	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
Segundo Suplente	Prof. Alfonso Durán Moreno

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

Refinería "Ing. Antonio Dovalí Jaime", Salina Cruz, Oaxaca
Laboratorio E-212, Facultad de Química, UNAM

Asesor

Prof. Modesto Javier Cruz Gómez

Sustentante

Columba Julieta López Ramírez



AGRADECIMIENTOS

A este gran país, mi México querido, que me ha dio la oportunidad de haber estudiado en esta grandiosa Universidad Nacional, que con su invaluable riqueza me dio conocimiento de la Ingeniería Química, crecimiento personal, excelentes profesores y grandes amigos.

Al Dr. M. Javier Cruz por hacer posibles los proyectos donde además de titularnos empezamos nuestra formación como profesionistas. Gracias por aceptarme en su equipo.

Al Ing. José Antonio Ortiz por ser de mis profesores que más admiro, porque además de transmitirnos sus conocimientos siembra en nosotros la semilla de la humildad con su ejemplo. Gracias por su apoyo y confianza.

A Juan Mario por ser un excelente profesor, por transmitirnos su experiencia profesional, porque en cada clase demuestra su amor por nuestra Universidad, por ese sincero interés de que obtengamos aprendizaje y crecimiento. Por creer en mí.

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, Ing. León Coronado Mendoza, Ing. Alejandro Villalobos Hiriart, M. en C. Celestino Montiel y a todos mis profesores por sus enseñanzas y por formar parte de lo que hasta ahora he llegado a ser.

A Georgina Martínez, Raúl Ávila, Alfredo Malvaez, Mario Arce, Ramón García, Víctor E. Rodríguez, muchas gracias por su ayuda en la realización de este trabajo.

A los Ingenieros de la Refinería de Salina Cruz, por su apoyo y amabilidad, Ing. Alejandrino Toledo, Ing. José Luis Oviedo, Ing. Jesús Valdivieso, Ing. Manuel Madera, Ing. Jorge A. Alfaro y al Ing. Gabriel Torres.

DEDICATORIAS

A ti "MA", porque solo de ti pude haber heredado esa fuerza de seguir adelante cuando llegan esos sentimientos de conformismo y desesperanza; cuando sentía que no tenía caso seguir luchando por mis sueños, solo me bastaba mirarte para continuar. Por ese gran amor que siempre me has dado.

A mi padre (†), por los momentos que pasaste junto a mí.

A mis adorados hermanos por lo grandiosos que son, por demostrar que solo basta querer y ocuparse para poder lograrlo; por esos momentos de tristezas y alegrías que hemos vivido juntos, por compartir conmigo mis sueños y esperanzas. A Monica, Vicente y Julio, los quiero mucho.

A todos mis compañeros y amigos con los que he caminado a lo largo de este camino, en especial a Claudia, Juan, Laura, Fermín, Israel, Hugo, Mille, Raúl, Marusa, Alfredo, Ignacio, Oscar, Arturo, Ismael, Alicia, Antonio, Fernando, Fco. Javier, Xochitl, Nes, y a mis grandes amigas, por siempre estar conmigo, por compartir mi felicidad o mis penas y porque son parte importante del logro de esta gran meta, a Gina, Adriana, Gris y Angeles.

A ti, que me levantas cuando caigo, que te engrandeces con mis logros, que logras a pesar de todo que siga creyendo y soñando, por sembrar en mí esa fe y esperanza que hacen posible mis sueños, porque gracias a ti amo la vida, te dedico una de mis tan deseadas metas.



ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN	1
-----------------	---

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1 Propiedades químicas y físicas de los óxidos de azufre	3
2.2 Química de los óxidos de azufre en la atmósfera	4
2.2.1 Reacciones naturales en la atmósfera	4
2.3 Fuentes emisoras de óxidos de azufre	5
2.3.1 Emisiones debidas al proceso de combustión	6
2.3.2 Emisiones de plantas generadoras de energía eléctrica	6
2.3.3 Emisiones por la industria del petróleo, PEMEX	6
2.3.4 Emisiones por fuentes móviles	7
2.3.5 Emisiones domésticas y otras	7
2.3.6 Emisiones industriales	8
2.4 Efectos de los óxidos de azufre en la salud y el ambiente	8
2.4.1 Efectos respiratorios en la salud	8
2.4.2 Efectos en la vegetación	9
2.4.3 Efectos en bienes materiales	9
2.4.4 Efectos sobre las condiciones atmosféricas	9
2.4.4.1 Lluvia ácida	10
2.5 Administración ambiental	12
2.5.1 Normatividad	12





2.5.2 Normatividad en PEMEX	16
2.6 Procesos de eliminación de óxidos de azufre	17
2.6.1 Unidades recuperadoras de azufre URA	17
2.6.1.1 Proceso Claus para la eliminación de H ₂ S de corrientes gaseosas	17
2.6.1.2 Proceso SuperClaus para la eliminación de H ₂ S de corrientes gaseosas	19
2.6.2 Tratamientos complementarios a los procesos de eliminación de óxidos de azufre	20
2.6.2.1 Procesos abajo del punto de rocío o APR	21
2.6.2.2 Métodos de recirculación o regeneración	21
2.6.2.3 Métodos de oxidación directa	22
2.7 Evaluación de riesgos	22
2.7.1 Identificación de Peligros	24
2.7.1.1 Análisis histórico de accidentes	25
2.7.1.2 Auditorias de seguridad	25
2.7.2 Tipos de evaluación	26
2.7.2.1 Medidas e indicadores de riesgos	27
2.7.3 Metodologías de evaluación de peligros	29
2.7.3.1 Inspección de seguridad (Safety Review)	29
2.7.3.2 Jerarquización relativa	29
2.7.3.3 Evaluación Preliminar de Peligros (Preliminary Hazard Analysis)	30
2.7.3.4 ¿Qué pasa sí? (What if Analysis)	30
2.7.3.5 ¿Qué pasa sí?/Lista de verificación (What if /Checklist Analysis)	30
2.7.3.6 Análisis de riesgos y operabilidad (HazOp Analysis)	31
2.7.3.7 Análisis de Efectos del Modo de Falla (FMEA Failure Mode and Effect Analysis)	31
2.7.3.8 Análisis de Árbol de fallas (FTA Fault Tree Analysis)	32
2.7.3.9 Análisis de Árbol de Eventos (ETA Event Tree Analysis)	32
2.7.3.10 Análisis Causa-Consecuencia (Cause-Consequence Analysis)	33





2.7.3.11 Análisis de Fiabilidad Humana (Human Reliability Analysis)	33
2.8 Análisis de Consecuencias	33
2.8.1 Clasificación de los modelos de estimación de consecuencias	35
2.8.1.1 Modelos de fuente	35
2.8.1.2 Modelos de dispersión	37
2.8.1.3 Modelos de explosiones e incendios	39
2.8.1.3.1 Tipos de explosiones	40
2.8.1.3.2 Tipos de incendios	41
2.8.1.4 Modelos de efectos	42
CAPÍTULO 3	
3. TRABAJO EN CAMPO	43
3.1 Descripción del proceso	43
3.2 Técnicas utilizadas en el Análisis de Riesgos	47
3.2.1 Análisis HazOp (Hazard and Operability Analysis)	47
3.2.2 Análisis de Árbol de Fallas (FTA Fault Tree Analysis)	53
3.2.2.1 Estimación cuantitativa de riesgos utilizando el Análisis de Árbol de Fallas por el método de conjuntos mínimos.	55
3.2.2.2 Simbología del Árbol de Fallas	57
3.2.2.3 Criterio para la asignación de probabilidades a los eventos básicos en un Árbol de Fallas.	57
3.2.2.4 Descripción de los escenarios para el Análisis de Árbol de Fallas	58
3.2.2.5 Diagramas del Árbol de Fallas	59
3.2.2.6. Calculo del Árbol de Fallas, con la técnica de conjuntos mínimos	59
3.2.2.6.1 Árbol de Fallas para los "Daños a la chimenea 102-L por alta temperatura	59
3.2.2.6.2 Árbol de Fallas para la "Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R"	61





3.2.3 Análisis de consecuencias utilizando el programa PHAST	63
3.2.3.1 Principales modelos utilizados por PHAST	64
3.2.3.1.1 Fuente de emisión a partir de un recipiente o tubería	64
3.2.3.1.2 Fuente de emisión definida por el usuario	65
3.2.3.1.3 Modelo de dispersión unificado	65
3.2.3.2 Parámetros	66
3.2.3.3 Evaluación de efectos de incendio, explosión en una planta de Azufre	67
3.2.3.4 Descripción de los escenarios de accidente	67
3.2.3.4.1 Datos requeridos para cada modelo	68
3.2.3.5 Consideraciones para el análisis de consecuencias	68

CAPÍTULO 4

4. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	73
4.1 Recomendaciones del análisis HazOp	73
4.2 Resultados y recomendaciones del análisis de árbol de fallas	75
4.3 Resultados del Análisis de Consecuencias	76
4.3.1 Escenario No. 1: Fuga y explosión de gas ácido en el Reactor térmico 101-R	76
4.3.2 Escenario No. 2: Fuga y explosión de gas ácido en el reactor catalítico 102-R	78
4.4 Conclusiones	80

ANEXOS

Anexo A. Especificaciones, Requisitos y Métodos de Prueba
de la NOM-137-SEMARNAT-2003

Anexo B. Diagramas de Tubería e Instrumentación





Anexo C. Análisis de Riesgos HazOp

Anexo D. Diagramas de Árbol de Fallas

Anexo E. Diagramas de Análisis de Consecuencias

BIBLIOGRAFIA





ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Límites máximos de permisibilidad	12
Tabla 2.2 Comparación de valores límites entre México y USEPA	13
Tabla 2.3 Normas que regulan las emisiones de SO ₂	14
Tabla 2.4 Tipo de estabilidad basado en la velocidad del viento y la radiación solar.	40 40

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Palabras guía y parámetros de proceso	47
Tabla 3.2 Nivel de riesgo con respecto a la frecuencia	50
Tabla 3.3 Nivel de riesgo con respecto a la gravedad.	51
Tabla 3.4 Matriz de riesgos	52
Tabla 3.5 Reglas booleanas de uso frecuente en el Análisis de Árbol de Fallas.	55 55
Tabla 3.6 Simbología para la elaboración de un Árbol de Fallas	57
Tabla 3.7 Criterios para asignar probabilidad.	58
Tabla 3.8 Descripción del escenario de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura	58 58
Tabla 3.9 Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.	59 59
Tabla 3.10 Relación de diagramas de Árbol de Fallas.	59
Tabla 3.11 Cálculo de conjuntos mínimos y probabilidad de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.	60 60
Tabla 3.12 Eventos básicos con sus probabilidades, de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura	61 61
Tabla 3.13 Cálculo de conjuntos mínimos y probabilidad de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R	62 62





Tabla 3.14 Eventos básicos con sus probabilidades del Árbol de Fallas de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R	62
Tabla 3.15 Relación entre el tipo de fuga y modelos de consecuencias empleadas	66
Tabla 3.16 Descripción de escenarios de incendio y explosión.	67
Tabla 3.17 Datos para el escenario fuga de gas ácido en el reactor térmico 101-R.	68
Tabla 3.18 Datos para el escenario fuga de gas ácido en el reactor catalítico 102-R.	68
Tabla 3.19 Niveles de radiación	69
Tabla 3.20 Niveles de sobrepresión	70
Tabla 3.21 Daños en plantas y refinerías	70

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Tabla de recomendaciones para el análisis HazOp	73
Tabla 4.2 Recomendaciones para el escenario de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.	75
Tabla 4.3 Recomendaciones para el escenario de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.	76
Tabla 4.4 Resultados de la explosión en escenario No. 1.	77
Tabla 4.5 Niveles de sobrepresión a diferentes distancias, por la explosión del escenario No. 1.	77





ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 Ciclo del SO ₂	11
Fig. 2.2 Actividades que garantizan la permanencia a largo plazo de una empresa	23 23

CAPÍTULO 3

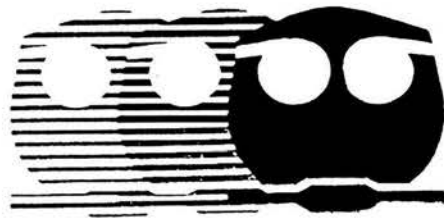
Fig. 3.1 Cálculo de probabilidades de la puerta Y	54
Fig. 3.2 Cálculo de probabilidades puerta O	54



*Ahora me doy cuenta de que la voz que
he estado escuchando desde que nací es ésta.
Y ésta la compañía de todas mis horas ... pero
nunca, hasta hoy, había yo venido a la casa de
su albedrío. Y me quedo aquí, con los ojos bajos
porque es así como el respeto mira a lo que es
grande.*

Rosario Castellanos

CAPÍTULO 1



Introducción



1. INTRODUCCIÓN

En el siglo pasado la preocupación por satisfacer las necesidades del ser humano se incremento enormemente, por esto la industria creció de forma desmesurada y con ella los riesgos de salud, de seguridad y del ambiente.

Al comienzo del siglo XXI nos encontramos con grandes retos por conquistar. En la industria uno de los objetivos primordiales es encaminarse a tener cero accidentes, no solo por las sanciones que tendría si se presentara un accidente o por la afectación que tendría la producción, sino por la seguridad de sus trabajadores y población en general. Otro objetivo es tener una industria totalmente limpia, esto es, libre de contaminación sin descargas al ambiente, la cual se encuentre, dentro de las especificaciones reguladas por las normas oficiales. Además de lograr una excelente calidad del producto. Todo esto también es de suma importancia, ya que alcanzando los objetivos obtenemos mejores rendimientos económicos y una mejor calidad laboral.

Conforme la sociedad ha venido tomando conciencia de estos riesgos, las organizaciones de todas clases están cada vez mas interesadas en alcanzar y demostrar un desempeño acertado, controlando el impacto de sus actividades, basándose en una legislación que cada vez es más estricta. Esto ha dado como resultado, la necesidad de implementar medidas de seguridad y protección ambiental, que mediante ciertos métodos o técnicas permitan la identificación y evaluación de riesgos para eliminarlos o controlarlos. La razón por la cual la evaluación de riesgos es de gran importancia, es que nos proporciona un sistema para comprender y administrar diferentes riesgos, proporcionándonos guías para la aplicación de los recursos.

Una de las principales fuentes de contaminación se debe a la dependencia mundial de energía que existe en nuestros días, especialmente la que proviene de hidrocarburos fósiles. El uso de los combustibles fósiles representa una emisión





considerable de SO_2 a la atmósfera. El principal problema ambiental que causan las emisiones de SO_2 , es la lluvia ácida.

En este trabajo se hace una revisión de las principales fuentes emisoras de óxidos de azufre y del efecto que tienen éstos en la salud y el ambiente, además se mencionan las principales Normas que regulan las emisiones a la atmósfera del SO_2 . También, se verán algunos de los procesos de eliminación de óxidos de azufre.

Para implementar las medidas de seguridad y protección ambiental se requiere de conocer los principales métodos de análisis de riesgos, para así evaluar y controlar éstos en una planta recuperadora de azufre. Los principales objetivos de la planta son, eliminar o por lo menos reducir las emisiones a la atmósfera de compuestos de azufre, tales como el SO_2 y el H_2S , y la obtención de azufre elemental, ya que mientras mayor sea la eficiencia en la recuperación de azufre, menor será la descarga al ambiente.

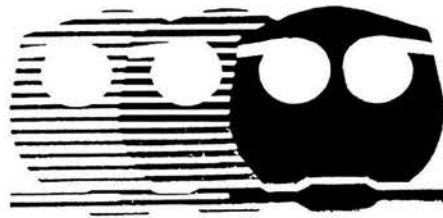
Por último, con el trabajo hecho en campo podremos comprender mejor la evaluación de riesgos llevándola a la práctica. Primero identificando los peligros que pudiera haber en cierto circuito delimitado y evaluándolos (Análisis HazOp), después cuantificando, determinando las probabilidades de que ocurra algún evento culminante (Árbol de Fallas), y finalmente analizando las consecuencias que pudieran tener cierto escenario no deseado (Análisis de Consecuencias).



*Les cuento lo que he descubierto.
El conocimiento puede ser comunicado, pero
no la sabiduría. Podemos encontrarla, vivirla,
fortalecernos con ella, hacer maravillas a través
de ella, pero no se puede comunicar y enseñar.*

*Siddhartha
Hermann Hesse*

CAPÍTULO 2



Antecedentes Teóricos



2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Los crudos contienen azufre (S) y nitrógeno (N), que al ser procesados se transforman en ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3) y en menor proporción sulfuros orgánicos (COS y CS_2) y mercaptanos (RSH). Estos crudos se procesan en refinerías donde se fraccionan para obtener productos de combustión, de estos procesos también se obtienen productos secundarios no deseados que para su eliminación se requiere de otros procesos, un ejemplo de estos productos secundarios es el H_2S que para su eliminación se requiere de una planta recuperadora de azufre.

La eliminación del azufre en los procesos de una refinería es de gran importancia debido a la necesidad de obtener productos de alta calidad sin contenido de azufre, pero la razón más importante es la cuestión ambiental ya que se deben eliminar las emisiones a la atmósfera, tales como el H_2S y SO_2 , o por lo menos reducirlas manteniéndolas por debajo de los límites máximos permitidos por las Normas Oficiales Mexicanas.

Estas plantas recuperadoras son una de las fuentes más importantes de emisión de estos contaminantes, por lo cual es importante conocer las propiedades químicas y físicas de los óxidos de azufre así como las fuentes emisoras de éstos.

2.1 Propiedades químicas y físicas de los óxidos de azufre⁽¹⁾

El azufre es un elemento no metálico que se encuentra en la naturaleza en estado libre o bien asociado con otros elementos y puede hallarse como impureza en el carbón y en combustibles derivados del petróleo. La combustión de materiales que contienen azufre conduce a la formación de óxidos de azufre. El trióxido de azufre se combina rápidamente con el agua para producir ácido sulfúrico, el cual fácilmente forma aerosoles o neblinas, fenómenos asociados con los problemas de visibilidad deficiente y con la "lluvia ácida" De las especies





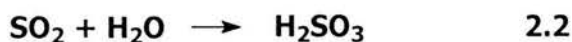
químicas del azufre los que se encuentran en forma gaseosa son el bióxido de azufre y el ácido sulfhídrico.

2.2 Química de los óxidos de azufre en la atmósfera

El bióxido de azufre es muy reactivo en la atmósfera y sufre importantes transformaciones químicas causando daños a los seres vivos y al ambiente a escala local y regional. El SO_2 tiene la capacidad de reaccionar fotoquímica y catalíticamente con otros contaminantes atmosféricos para formar especies importantes como el trióxido de azufre, el ácido sulfúrico y diversas sales del ácido sulfúrico.

2.2.1 Reacciones naturales en la atmósfera

Los gases se pueden lavar de la atmósfera por precipitación o adsorberse sobre partículas sólidas y eliminarse por gravedad. También reaccionan con otros gases o partículas de la atmósfera para formar compuestos nuevos que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Por ejemplo, una serie de reacciones elementales en las que se encuentran involucrados algunos compuestos de azufre presentes en la atmósfera es la siguiente:



La ecuación 2.1 podría tomar horas en la atmósfera, y la ecuación 2.2 podría llevarse a cabo en horas o días, de acuerdo con la disponibilidad de energía fotoquímica y de otros compuestos que podrían actuar como catalizadores. La ecuación 2.3 se puede llevar a cabo en cuestión de minutos en una atmósfera urbana donde hubiera una concentración relativamente alta de PbO derivada de la combustión de gasolina con plomo en automóviles o de fuentes industriales. Cabe





mencionar que en México la gasolina con plomo ya no está a la venta desde la década de los 90's, debido a las normas que regulan las emisiones al aire.

En una atmósfera más limpia la ecuación 2.3 podría sustituirse por:



El H_2SO_4 se encontraría en forma de moléculas de vapor dispersas (esto es, en concentraciones muy bajas que se absorben con facilidad en las gotas de lluvia para caer como lluvia ácida, o como partículas sólidas, las cuales se fusionan hasta una humedad relativa del 25% para formar gotas líquidas). Es obvio que se producen muchas reacciones secundarias entre los contaminantes; tantas que se siguen identificando nuevos contaminantes significativos⁽²⁾.

Para poder contrarrestar los efectos de este tipo de contaminación, además de conocer las propiedades y reacciones sobre la salud y el ambiente, es importante identificar las fuentes de emisión de estos.

2.3 Fuentes emisoras de óxidos de azufre

Existen dos principales fuentes de emisiones de óxidos de azufre y son básicamente: las biogénicas y las antropogénicas. De forma natural, el óxido de azufre es emitido principalmente por actividad volcánica y en menor grado por pantanos⁽¹⁾.

Los óxidos de azufre (SO_x) se emiten principalmente como dióxido de azufre (SO_2) en la combustión de combustóleo y carbón en fuentes estacionarias. También, se emite una cantidad muy pequeña de SO_x en la combustión de gasolina y combustibles diesel. Las fuentes de combustión también emiten pequeñas cantidades de SO_3 ⁽²⁾.





En México, las emisiones de SO_x y NO_x (provenientes de los sectores energético, industrial, de transporte y doméstico) indican una carga aproximada de 2.2 y 1.5 millones de toneladas respectivamente⁽³⁾.

2.3.1 Emisiones debidas al proceso de combustión⁽¹⁾

Dependiendo de la naturaleza del combustible se presentan diferentes pasos en el proceso de combustión. Para combustibles sólidos las etapas principales son: calentamiento, deshidratación o secado, gasificación y combustión.

El azufre contenido en el combustible sólido es liberado durante el proceso de gasificación y se oxida en la etapa de combustión para convertirse principalmente en SO_2 , ya que una parte muy pequeña del azufre (no más del 5%) se convierte en SO_3 precursor del ácido sulfúrico. La mayor parte del azufre se libera a la atmósfera en estado gaseoso. La emisión de óxido de azufre depende evidentemente de la cantidad de azufre en el combustible sólido.

2.3.2 Emisiones de plantas generadoras de energía eléctrica⁽⁴⁾

Las plantas generadoras de energía eléctrica son responsables de grandes volúmenes de efluentes gaseosos. En realidad se considera que ésta es la causa de la mayor parte de las emisiones de contaminantes al aire, ya que cuando se queman combustibles fósiles en el proceso de combustión se producen tanto óxidos de azufre como nitrógeno, además de monóxido de carbono y compuestos fluorados y clorados. A nivel nacional, las emisiones generadas en la operación de plantas termoeléctricas sobrepasa el millón de toneladas anuales.

2.3.3 Emisiones por la industria del petróleo, PEMEX⁽⁵⁾

Es la industria encargada del procesamiento de petróleo crudo para la producción de gasolina, aceites lubricantes y otras materias primas de la industria petroquímica. Las refinerías de petróleo también son fuentes importantes de SO_2 .





Las emisiones al aire incluyen los principales compuestos generados por la combustión y la evaporación de hidrocarburos, así como los producidos por la combustión de corrientes gaseosas y líquidas que contienen azufre. Los contaminantes reportados son los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas suspendidas totales (PST) y compuestos orgánicos totales (COT).

Durante 2001, las emisiones al aire constituyeron 77% de las descargas contaminantes totales de Petróleos Mexicanos. De éstas, el 71% son emisiones de SO_x y 11% son COT.

Aproximadamente 55% de las emisiones de SO_x se generaron en las refinerías, siendo Tula (16%) y Salina Cruz (15%) las que reportaron mayores emisiones, en tanto que 23% de los SO_x fueron emitidos por las plantas endulzadoras y de recuperación de azufre de los centros procesadores de gas, particularmente Nuevo PEMEX (8%) y Cactus (3%). Es importante destacar que la participación de Cactus en la generación de SO_x se redujo drásticamente, debido a la entrada en operación de las plantas recuperadoras de azufre con proceso Súper Claus. El 18% de los SO_x se originó en las instalaciones marinas de PEP, principalmente en los quemadores del Activo Cantarell (13%).

2.3.4 Emisiones por fuentes móviles

La principal contribución se debe a las máquinas que requieren combustible diesel para su operación. Las fuentes móviles son responsables de cerca de 97,000 toneladas anuales de SO_x en el país, provenientes principalmente de las grandes urbes⁽⁵⁾.

2.3.5 Emisiones domésticas y otras

El sector doméstico es uno de los principales demandantes de energía, utilizando frecuentemente aceites combustibles y gas natural. La utilización de estos combustibles provoca emisiones de NO_x , mientras que el SO_2 es producido





principalmente durante la combustión de aceites domésticos. Las fuentes domésticas en el país generan alrededor de 47,700 toneladas anuales de SO_2 ⁽³⁾.

2.3.6 Emisiones industriales

En la industria química, las plantas productoras de ácido sulfúrico son las principales emisoras de óxidos de azufre, esta industria emite en México 87,000 ton de SO_x /año. En la metalúrgica los óxidos de azufre se emiten en la producción, procesamiento y refinado de metales así como en la refinación de minerales sulfurados, sus emisiones en México son de cerca de 120,000 ton de SO_x /año⁽⁴⁾.

2.4 Efectos de los óxidos de azufre en la salud y el ambiente

En los primeros episodios de contaminación del aire de los que se tienen registros, los efectos de dicha contaminación eran detectables con claridad por medio de los sentidos, sin la ayuda de instrumentos especiales. Desde entonces, los óxidos de azufre ya representaban una seria amenaza; el bióxido de azufre tenía olor, hacía que las superficies plateadas se tornaran negras, causaba daños a las plantas y, en situaciones extremas, dificultaba la respiración⁽²⁾. A continuación se describen brevemente los siguientes efectos en la salud y el ambiente:

2.4.1 Efectos respiratorios en la salud

Niveles máximos de SO_2 en el aire pueden causar temporalmente dificultades para respirar a gente con asma. Largos periodos de exposición a altos niveles de gases y partículas de SO_2 causan enfermedades respiratorias y agravan enfermedades existentes del corazón.

La exposición a niveles de bióxido de azufre del orden de 1 ppm lleva a la constricción de las vías respiratorias. La NOM-022SSA1-1993 establece el límite de concentración de SO_2 en la atmósfera igual 0.13 ppm en un periodo de 24 h y para





la protección de la salud de la población susceptible de 0.3 ppm como promedio anual.

2.4.2 Efectos en la vegetación

La lluvia ácida daña bosques y lagos, y en consecuencia estas corrientes ácidas son dañinas para los peces. También se observa la destrucción de cosechas y la aparición de manchas y decaimiento de matorrales y plantas ornamentales, que puede desencadenar en su destrucción completa. Aunque una exposición breve a una baja concentración solamente daña a la planta temporalmente, una exposición prolongada causa la muerte de las células vegetales⁽¹⁾. Después de un largo tiempo de exposición a este tipo de contaminación cambian las variedades naturales de plantas y animales en un ecosistema.

2.4.3 Efectos en bienes materiales

Los efectos materiales son tanto físicos como químicos. Como resultado de la erosión de la superficie de los materiales por partículas se produce un desgaste de las superficies y horadaciones⁽¹⁾.

Los óxidos de azufre y nitrógeno reaccionan en la atmósfera para formar compuestos ácidos que atacan las superficies metálicas, un problema que se ha agudizado en especial para las industrias de comunicaciones, dispositivos de control y computadoras además de las redes de fluido eléctrico⁽²⁾.

2.4.4 Efectos sobre las condiciones atmosféricas

Quizá el efecto más evidente de la contaminación sobre las propiedades de la atmósfera es la reducción de la visibilidad, que es el resultado de la absorción y dispersión de la luz que provocan las moléculas de gas y las partículas. La absorción de la luz de ciertas longitudes de onda por moléculas gaseosas y por partículas, es algunas veces responsable de las coloraciones de la atmósfera.





Además del efecto de la dispersión de luz, la contaminación de aire afecta los climas urbanos con un aumento de la formación de niebla y un decremento de la radiación solar. Se ha observado que la frecuencia en la formación de niebla es mayor en las ciudades que en el campo a pesar del hecho de que la temperatura del aire tiende a ser más alta y la humedad relativa a ser más baja en las ciudades que en el campo. La explicación de este hecho se debe al mecanismo de formación de la niebla. Con altas concentraciones de bióxido de azufre, las gotas de ácido sulfúrico formadas por la oxidación del bióxido sirven como núcleos de condensación para la formación de gotas de niebla pequeñas.

Por otro lado, las reacciones químicas producen, por ejemplo, ozono que es un precursor del neblumo o ácido sulfúrico y nítrico, los cuales son responsables del fenómeno conocido como "lluvia ácida" causante de efectos negativos en los materiales, el suelo, el agua, otros ecosistemas y la salud humana⁽¹⁾.

2.4.4.1 Lluvia ácida⁽⁶⁾

"Lluvia ácida" es un término muy amplio que se emplea para describir las diversas maneras en que los ácidos caen de la atmósfera. Un término más preciso es deposición ácida, la cual consta de dos partes: húmeda y seca.

La deposición húmeda se refiere a la lluvia, la niebla y la nieve ácidas. Al fluir sobre el suelo y a través de éste, esa agua ácida afecta a una variedad de plantas y animales. La magnitud de dichos efectos depende de muchos factores, entre ellos el grado de acidez del agua, la composición química y la capacidad de tamponación (resistencia del agua o del suelo a los cambios de pH) de los suelos en cuestión, así como las clases de peces, árboles y otros seres vivientes que dependen del agua.

La deposición seca se refiere a los gases y partículas ácidos. Aproximadamente la mitad de la acidez que hay en la atmósfera vuelve a la tierra en forma de deposición seca. El viento sopla estas partículas y gases ácidos sobre





los edificios, automóviles, casas y árboles. Los gases y partículas depositados en seco pueden ser lavados de los árboles y otras superficies por las tormentas de lluvia. Cuando así sucede, el agua que se escurre sobre el terreno suma dichos ácidos a la lluvia ácida, produciendo una combinación más ácida que la lluvia por sí sola. Los vientos predominantes soplan los compuestos que causan la deposición tanto húmeda como seca a través de las fronteras tanto estatales como nacionales, y a veces a lo largo de cientos de millas.

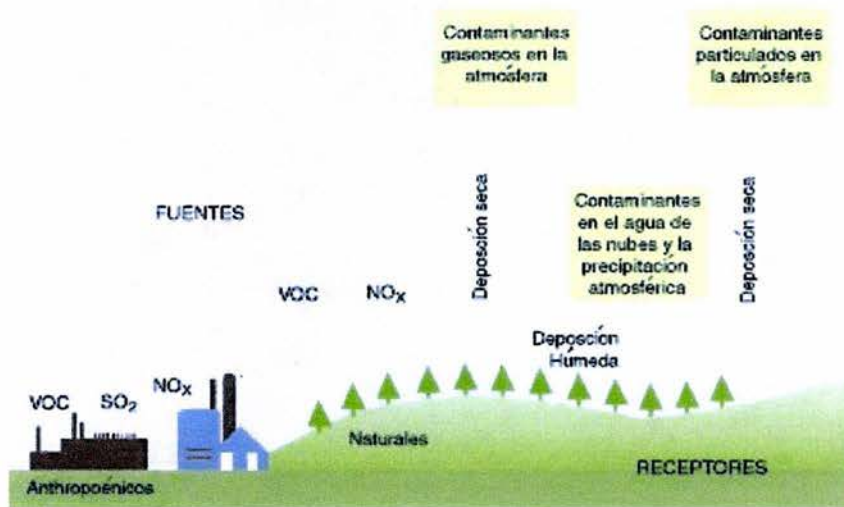


Fig. 2.1 Ciclo del SO_2

Los científicos descubrieron, y han podido confirmar, que el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son las causas principales de la lluvia ácida. En los Estados Unidos, alrededor de $2/3$ de todo el SO_2 y $1/4$ de todos los NO_x provienen de la generación de energía eléctrica que depende de combustibles fósiles tales como el carbón.

La lluvia ácida ocurre cuando estos gases reaccionan en la atmósfera con el agua, el oxígeno y otras sustancias químicas y forman diversos compuestos ácidos. La luz solar aumenta la rapidez de dichas reacciones. El resultado consiste en una solución suave de ácido sulfúrico y ácido nítrico.





El uso intensivo de combustibles fósiles representaba una emisión considerable de SO_2 a la atmósfera. Los problemas ambientales causados por la emisión de SO_2 como la lluvia ácida, ha resultado en estrictas regulaciones de éstas emisiones⁽⁷⁾.

2.5 Administración ambiental

En México la entidad encargada de la protección ambiental es la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

2.5.1 Normatividad

Se han establecido seis contaminantes atmosféricos que dañan a la salud, entre los que se encuentra el bióxido de azufre. Los límites máximos permisibles para estos contaminantes se establecen en las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por la Secretaría de Salud, se muestran en la tabla 2.1⁽⁷⁾.

Tabla 2.1 Límites máximos de permisibilidad

CONTAMINANTE	VALORES LÍMITE			NOM SSA1-1993
	Exposición aguda		Exposición crónica Para protección de la salud de la población susceptible	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable		
Ozono (O_3)	0.11 ppm (1 h)	1 vez cada 3 años	-	20
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (8 h)	1 vez al año	-	21
Bióxido de azufre (SO_2)	0.13 ppm (24 h)	1 vez al año	0.03 ppm (*)	22
Bióxido de nitrógeno (NO_2)	0.21 ppm (1 h)	1 vez al año	-	23
Partículas suspendidas totales (PST)	260 mg/m^3 (24 h)	1 vez al año	75 mg/m^3 (*)	24
Partículas Fracción Respirable (PM-10)	150 mg/m^3 (24h)	1 vez al año	50 mg/m^3 (*)	25
Plomo (Pb)	-	-	1.5 mg/m^3 (**)	26

(*) Promedio anual

(**) Promedio aritmético de 3 meses





En la tabla 2.2 se presenta una comparación de los valores límite de las normas mexicanas con normas internacionales. En lo que respecta al bióxido de azufre, el límite de la Norma Oficial Mexicana es muy similar al fijado por la Agencia Estadounidense de Protección al Ambiente (USEPA).

Tabla 2.2 Comparación de valores límites entre México y USEPA

CONTAMINANTE	MÉXICO	USEPA
Partículas suspendidas totales (g/m ³)	260	260
Bióxido de azufre (ppm-24h)	0.13	0.14
Monóxido de carbono (ppm-8h)	11	9
Bióxido de nitrógeno (ppm-8h)	0.21	0.05 al año
Ozono (ppm-1h)	0.11	0.12

En México se han emitido varias normas oficiales y técnicas que regulan las emisiones del bióxido de azufre, los métodos usados para su cuantificación y otras relacionadas con el contenido de azufre en los combustibles (Tabla 2.3).

De las normas mencionadas en la tabla 2.3, la que nos interesa debido al tema de esta tesis es la NOM-137-SEMARNAT-2003. Contaminación atmosférica. Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos. Control de emisiones de compuestos de azufre⁽⁸⁾.

Algunas de las consideraciones para la elaboración de esta norma fueron:

- ❖ Que para la protección del aire ambiente es necesario controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera, con la finalidad de asegurar la calidad del aire en beneficio de la salud y bienestar de la población y de preservar el equilibrio ecológico en las regiones donde se ubican instalaciones industriales.
- ❖ Que dado que en el proceso de desulfuración de gases amargos y condensados amargos se genera gas ácido, cuyos componentes principales





son bióxido de carbono y ácido sulfhídrico, siendo éste un gas de muy elevada toxicidad, es necesario evitar su liberación a la atmósfera.

Tabla 2.3 Normas que regulan las emisiones de SO₂

NÚMERO DE NORMA	DESCRIPCIÓN	FECHA DOF
NOM-022-SSA1-93	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población	23-12-94
NOM-085-ECOL-94	Partículas suspendidas, bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y bióxido de azufre y condiciones de operación de equipos de calentamiento	02-12-94
NOM-038-ECOL-93	Métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición	18-10-93
NOM-086-ECOL-94	Contaminación atmosférica. Especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles	02-12-94
NMX-AA-055-1979	Contaminación atmosférica. Fuentes fijas. Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto	06-09-79
NMX-AA-056-1980	Contaminación Atmosférica. Fuentes fijas. Determinación de bióxido de azufre, trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto	17-06-80
NOM-137-SEMARNAT-2003	Contaminación atmosférica. Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos. Control de emisiones de compuestos de azufre	31-01-03

❖ Que existen diversos sistemas para el control de estas emisiones, de los cuales el más utilizado es el que se basa en la recuperación de los compuestos de azufre, como azufre elemental en plantas recuperadoras de





azufre, las cuales emiten a la atmósfera sólo una fracción de azufre remanente, en forma de bióxido de azufre y trazas de ácido sulfhídrico.

El objetivo esta Norma Oficial Mexicana es establecer las especificaciones y los requisitos del control de emisiones de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos, así como los métodos de prueba para verificar el cumplimiento de la misma.

La evaluación de la conformidad será realizada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente o los organismos de verificación acreditados y aprobados en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Las especificaciones, requisitos y métodos de prueba se muestran en el anexo A.

También existe la norma internacional ISO 14001⁽⁹⁾, esta es un instrumento que permite administrar los impactos de una actividad, de un producto o de un servicio en relación con el ambiente. Es un Sistema de Administración Ambiental (SAA), un método de organización interna que permite estructurar un proceso de mejora continua permanente de los resultados obtenidos. Este se basa en el principio de mejora continua, planear, implantar, verificar y revisar. Esta norma es de aplicación voluntaria, ya que ningún texto legal obliga a que una organización implante sus requisitos.

Muchas organizaciones han realizado "revisiones" o "auditorias" ambientales para evaluar su desempeño ambiental. Sin embargo, estas "revisiones" y "auditorias" pueden que no sean suficientes para proporcionar a una organización el aseguramiento de que su desempeño no sólo cumple, sino que continuará cumpliendo, sus requisitos legales y de política. Para ser efectivas, las auditorias y revisiones necesitan ser conducidas dentro de un sistema de Administración estructurado e integrado a la actividad administrativa.





El alcance de esta Norma Mexicana especifica los requisitos que debe tener un sistema de administración ambiental, para permitir a una organización la formulación de una política y objetivos, tomando en cuenta los requisitos legales y la información sobre impactos ambientales significativos. Se aplica a aquellos aspectos ambientales que están bajo el control de la organización o sobre los cuales puede tener influencia. No establece por sí misma criterios específicos de desempeño ambiental, esto significa que establece los requisitos pero no da los medios ni impone métodos.

Esta Norma Mexicana es aplicable a cualquier organización que quiera:

- a) Implantar, Mantener y Mejorar un sistema de Administración ambiental;
- b) Estar segura del cumplimiento de su propia política ambiental;
- c) Demostrar dicho cumplimiento a otros;
- d) Buscar la certificación/registro de su SAA por una organización externa;
- e) Hacer una autodeterminación y autodeclaración del cumplimiento con esta Norma Mexicana.

2.5.2 Normatividad en PEMEX

PEMEX cumple con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, cumple con la NOM-137-SEMARNAT-2003. Contaminación atmosférica. Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos. Control de emisiones de compuestos de azufre, también cumple con la certificación ISO 14001 y la de "Industria Limpia".

Asimismo, se han elaborado las disposiciones generales de Seguridad y Protección Ambiental, Calidad, Protección Civil y Salud Ocupacional para prevenir riesgos durante el diseño, construcción, operación, inspección, mantenimiento y desmantelamiento de las instalaciones de la empresa⁽⁵⁾.





2.6 Procesos de eliminación de óxidos de azufre

El azufre en fase gaseosa está presente en los compuestos del petróleo principalmente como H_2S . Varios procesos de la industria petroquímica tienen como objetivo eliminar este compuesto mediante el endulzamiento de los gases de combustión disminuyendo las emisiones de SO_x a la atmósfera. El Proceso Claus es sin duda alguna el más utilizado en el endulzamiento del gas amargo en la industria petroquímica y otras unidades recuperadoras de azufre existentes en gran medida están basadas en el principio de reacción Claus.

2.6.1 Unidades recuperadoras de azufre URA

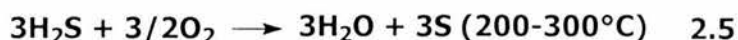
Las unidades recuperadoras de azufre, producen azufre líquido a partir de ácido sulfhídrico contenido en efluentes gaseosos provenientes de unidades endulzadoras y desulfuradoras. Dependiendo de los requerimientos ambientales, las unidades recuperadoras de azufre, pueden tener hasta 3 reactores Claus trabajando. Este proceso presenta la ventaja de que si el gas tratado es acompañado de amoníaco, las características de los equipos previenen la formación de compuestos NH_3/SO_3 así como en los subsecuentes quemadores la ausencia de SO_3 alarga la vida del catalizador del reactor de 2 hasta 10 años de vida útil. Dependiendo del tipo de catalizador, las emisiones de las URA pueden ser de hasta 10 ppm de SO_x ⁽¹⁰⁾.

2.6.1.1 Proceso Claus para la eliminación de H_2S de corrientes gaseosas

El proceso Claus utiliza la oxidación de ácido sulfúrico en aire para eliminarlo de gases de combustión generando como resultado del proceso azufre elemental.

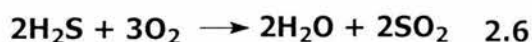
El proceso de manera general consiste de un horno de alta temperatura de dos reactores y una torre de lavado. En forma resumida, la producción de azufre elemental se describe como sigue:



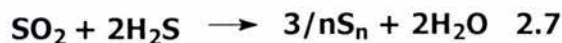


A partir de la oxidación del H_2S se produce azufre elemental, evitando así la emisión de ácido sulfhídrico a la atmósfera.

La reacción 2.5 ocurre en 2 etapas, en la primera, utilizando catalizadores en el horno, se oxida parte del H_2S en el gas a tratar para la formación de bióxido de azufre según lo describe la reacción de la siguiente ecuación:

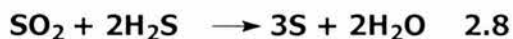


Posteriormente, en el primer reactor, conteniendo un catalizador de alúmina activada, una mezcla de óxidos de cobalto y molibdeno y otros catalizadores, se eleva la temperatura de los reactivos de 320 a 390°C y se da la primera reacción de producción de azufre elemental, misma que ocurre gracias a la presencia de SO_2 y H_2S en el sistema:



Dado que la reacción descrita por la ecuación 2.7 es altamente exotérmica, es necesario implementar sistemas de enfriamiento de los gases y para la condensación de la primera porción de azufre elemental formado⁽¹¹⁾.

En el reactor, el H_2S restante es oxidado en presencia de dióxido de azufre a una temperatura de 250-270°C usualmente con un catalizador de Fe_2O_3 según la siguiente reacción:



La torre de lavado trabaja a 120°C usando reflujo de azufre proveniente de un tanque en el extremo inferior de la misma, que sirve para lavar el azufre elemental formado. Los residuos que abandonan en estado gaseoso esta columna son N_2 , H_2O , CO_2 y residuos sin reaccionar de H_2S y SO_2 ⁽¹¹⁾.





Es inevitable la formación de otros compuestos de azufre, que también son considerados como contaminantes, debido a la presencia de otros hidrocarburos en la alimentación del proceso. Principalmente los productos alternos que se forman son CS_2 y COS . Se puede decir que una corriente de salida de un proceso Claus definitivamente no va libre de H_2S , esto debido a las limitadas condiciones de equilibrio para las reacciones que ocurren en el horno y en los dos reactores principales y, además, la inevitable presencia de SO_2 también en los gases de salida pues tampoco su conversión es absoluta además de que siempre habrá COS y CS_2 ⁽¹²⁾.

2.6.1.2 Proceso SuperClaus para la eliminación de H_2S de corrientes gaseosas

A pesar de que los procesos Claus son muy eficientes en la conversión de compuestos de azufre elemental (95-98% de conversión), las emisiones a la atmósfera por el 2 al 5% restante de SO_x son importantes debido a los grandes volúmenes de gas generados diariamente por grandes instalaciones petroquímicas.

Para resolver este problema se han propuesto modificaciones al proceso Claus tendientes a aumentar aún más la eficiencia de conversión de azufre. Una tecnología que presenta una alta eficiencia de conversión de H_2S a azufre elemental es el Proceso SuperClaus, patentado por Stork Engineers y Contractors, del cual ya se encuentran operando⁽¹³⁾.

Este proceso consiste de una etapa térmica, seguida de tres unidades de reacción catalítica. Entre cada uno de los reactores existen condensadores donde se remueve el azufre elemental. Dos de los reactores están empacados con un catalizador Claus estándar mientras que el tercer reactor está empacado con el nuevo catalizador selectivo SuperClaus. En la etapa térmica, el gas es quemado subestequiométricamente con una cantidad controlada de aire de combustión de tal modo que el gas emitido del segundo reactor contiene de 0.8 a 1.5% vol. de





H₂S. El gas de cola remanente es completamente oxidado en un incinerador antes de ser descargado por una chimenea.

Una característica principal es que el catalizador oxida completamente el H₂S a azufre elemental; además no es sensible a la presencia de vapor de agua.

2.6.2 Tratamientos complementarios a los procesos de eliminación de óxidos de azufre

Como se ha mencionado, el proceso Claus es el más importante para la eliminación del H₂S contenido en efluentes gaseosos de unidades petroquímicas e industriales. El tratamiento está basado en la conversión del H₂S a azufre elemental. Sin embargo, dadas las limitaciones de equilibrio, apenas entre un 95 y un 98% del azufre alimentado puede ser recuperado por una unidad convencional de este tipo. Además de que es inevitable la formación de SO₂ ya que éste es un reactivo importante en una de las etapas del proceso y, considerando las bajas eficiencias, siempre habrá SO₂ sin reaccionar, que al final del proceso, es liberado a la atmósfera. Dado el ciclo de reacciones que ocurren en el horno y los reactores del proceso se da, además, la formación de compuestos de azufre también indeseables para la atmósfera que deben ser tratados, como COS, CS₂ y CO₂.

Bajo la presión de las regulaciones ambientales cada vez más estrictas se ha hecho necesario el desarrollo de tecnologías para incrementar la recuperación de azufre de corrientes gaseosas ricas en H₂S. Se han desarrollado diferentes métodos de tratamiento de gases de cola de unidades Claus a partir de las cuales se logra incrementar la eliminación de azufre de estos gases y con ello incrementar la producción de azufre elemental con valor comercial.

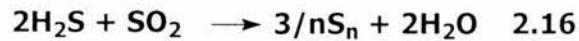
Con la invención de estos procesos se ha remediado la necesidad de plantas Claus grandes y de altos costos de operación ya que encadenando una planta Claus con sólo una etapa térmica y una etapa catalítica a un proceso complementario se pueden lograr recuperaciones por arriba del 99%⁽¹⁴⁾.





2.6.2.1 Procesos abajo del punto de rocío o APR⁽¹⁴⁾

Los procesos abajo del punto de rocío o APR son aquellos en los que, a partir de una corriente rica en H₂S, se produce azufre elemental mediante la conocida reacción de Claus:



La reacción Claus térmicamente debe ser conducida a temperaturas en el intervalo de 800-1400°C o bien puede ser conducida catalíticamente y, con ello, reducir las temperaturas de reacción a 120-450°C. En este último caso, generalmente se utiliza la alúmina, la bauxita o el Al₂O₃ como catalizador.

Los procesos denominados APR, como su nombre lo indica, se basan en la reacción Claus conducida a temperaturas por debajo del punto de fusión (rocío) del azufre (230-250°C).

Los gases ingresan a los lechos catalíticos, generalmente con una relación de H₂S/SO₂ de 2:1, forman azufre elemental en fase gaseosa de acuerdo con la reacción 2.23 y luego éste se separa por condensación.

Con estos métodos, la recuperación de azufre puede ser hasta del 99.6%. Sin embargo, una desventaja del proceso es que la variación de la concentración de azufre y del flujo de alimentación puede afectar la eficiencia del mismo. En la práctica, ante estos cambios de composición y flujo, una unidad APR alcanza recuperaciones de azufre hasta del 99%.

2.6.2.2 Métodos de recirculación o regeneración

Los procesos de recirculación o regeneración son utilizados para el tratamiento de efluentes gaseosos cuyo contenido de SO₂, H₂S y otros compuestos de azufre es importante y por ello no pueden ser emitidos a la atmósfera sin un tratamiento previo pero, a su vez, las concentraciones de dichos compuestos son tales que no garantizarán altas eficiencias en procesos de tratamiento como el de





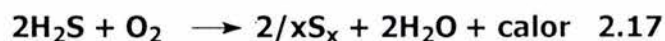
Claus. En estos casos es necesario producir corrientes gaseosas ricas en dichos compuestos para que éstas puedan ser tratada con éxito en procesos convencionales de tratamiento y, por otro lado, producir corrientes de gas purificado que podrán ser emitidas a la atmósfera cumpliendo con las regulaciones ambientales.

Una de las ventajas de estos procesos es que los niveles de recuperación son altos y uniformes (>99.5%), aunque son procesos de alto costo por la necesidad de incluir el lavado de gas en las columnas de absorción y etapas de regeneración del disolvente utilizado en el lavado del gas⁽¹⁴⁾.

2.6.2.3 Métodos de oxidación directa

Una planta Claus común (con etapa térmica y una catalítica) puede eliminar un 95% en peso del azufre presente en la corriente de alimentación. Cuando una unidad Claus es complementada con un proceso de tratamiento de oxidación directa de dichos gases de cola el porcentaje de eliminación en peso puede incrementarse hasta 99.5%⁽¹⁴⁾.

Estos métodos son intermedios entre los APR y los de recirculación, en cuanto a los requerimientos de costos y los niveles de recuperación de azufre. La característica principal de estos procesos es el uso de reactores de oxidación directa de H₂S a azufre elemental.



Además, pueden incluir etapas de condensación de azufre. Las recuperaciones de azufre por medio de estos procesos van de 99 a 99.5%⁽¹⁴⁾.

2.7 Evaluación de riesgos

Una de las prioridades de la industria es la seguridad. La evolución de ésta requiere un enfoque administrativo para garantizar una mejora continua del





proceso. La seguridad se encuentra en uno de los vértices de la pirámide, que permite asegurar la permanencia de una empresa a largo plazo (ver Fig. 2.2)⁽¹⁵⁾.



Fig. 2.2 Actividades que garantizan la permanencia a largo plazo de una empresa

Como ya se mencionó se debe contar con un sistema de administración de la seguridad dentro de las instalaciones de proceso para asegurar la correcta aplicación de cualquier programa de seguridad, puesto que los elementos de un programa no están aislados sino que alcanzan su mayor efectividad al integrarse con el resto de las administraciones.

A través de los años se ha venido incrementando la tendencia de institucionalizar los programas de administración de riesgos en las industrias de proceso. Este incremento se debe a una variedad de factores que incluyen:

- i. La ocurrencia de accidentes industriales mayores.
- ii. Una legislación más estricta e iniciativas para regular la seguridad de los procesos químicos.
- iii. La publicación y evolución de programas de administración de riesgos por varias organizaciones industriales.

Un sistema de administración de riesgos efectivo consta de un control administrativo responsable, aplicación lógica de las mejores técnicas de análisis disponibles e involucra a todo el personal.





Los elementos claves que deben incluirse en un programa de administración de riesgos incluye⁽¹⁵⁾:

- Identificación de peligros
- Análisis de consecuencias
- Respuestas para controlar o manejar riesgos
- Procedimientos
- Entrenamiento
- Planeación de emergencias
- Investigación de incidentes
- Auditorias

En esta tesis no se detalla el tema de "Administración de riesgos" ya que éste se describe en otra tesis⁽¹⁶⁾. Aquí solo nos enfocaremos en los dos primeros elementos.

Todo análisis de riesgos debe comenzar por identificar los peligros presentes dentro de sus instalaciones de proceso; pues un peligro no identificado no puede ser analizado. Así, identificado se debe hacer la evaluación de los riesgos.

2.7.1 Identificación de Peligros

Un estudio de identificación de peligros es un esfuerzo organizado para identificar y analizar situaciones que puedan causar daños asociados con un proceso o actividad, es un paso muy importante dentro de un análisis de riesgos.

Dentro de los métodos para la identificación de peligros se encuentra el análisis histórico de accidentes y el de auditorias de seguridad, esta última fue la primera en usarse y sigue siendo empleada con frecuencia.





2.7.1.1 Análisis histórico de accidentes

Esta herramienta emplea los datos recogidos de accidentes pasados, la ventaja de esta herramienta es que son peligros reales, que sin duda pueden ocurrir. La técnica permite la identificación de peligros específicos y permite evaluar si estos accidentes pueden ocurrir o no.

2.7.1.2 Auditorias de seguridad

Las auditorias de seguridad se usan para asegurar que la planta, su operación y prácticas de mantenimiento sigan la intención de diseño y estándares de construcción. El procedimiento de estas auditorias mantiene al personal alerta de los peligros del proceso, revisa los procedimientos de operación, busca identificar equipos nuevos o cambios en los procesos que introduzcan nuevos peligros, evalúa las bases de control y sistemas de seguridad, revisa la aplicación de nueva tecnología y verifica que el mantenimiento sea adecuado.

Los beneficios de una evaluación de peligros son:

- Menor número de accidentes en la vida de la planta o área de proceso.
- Reducción de las consecuencias de los accidentes que lleguen a ocurrir.
- Mejor respuesta a emergencias.
- Mejor entrenamiento y conocimiento del proceso.
- Operaciones más eficientes y productivas.
- Mejores relaciones con las comunidades y con las dependencias reguladoras.

Sin embargo estos beneficios no pueden alcanzarse sin una inversión considerable. Realizar análisis de alta calidad tampoco garantiza que los accidentes no ocurrirán. Se requiere dar seguimiento a las recomendaciones y un claro compromiso de la dirección para cumplir los objetivos⁽¹⁶⁾.





El creciente interés en la evaluación de riesgos no se debe a que eliminen incertidumbres o riesgos, más bien, la ventaja clave de la evaluación de riesgos es que proporciona un marco sistemático basado en principios científicos para comprender y administrar diversos riesgos, en otras palabras, proporciona guías para la aplicación de recursos monetarios en la protección de la salud, seguridad pública y el ambiente⁽¹⁷⁾.

Evaluación de riesgos puede definirse como el proceso de estimar la probabilidad de que ocurra y la magnitud probable de los efectos adversos de un acontecimiento. En otras palabras se centra en la identificación de peligros y análisis de consecuencias.

2.7.2 Tipos de evaluación⁽¹⁷⁾

Los principales tipos de evaluación de riesgos se analizan brevemente a continuación:

1. Riesgos de seguridad: Por lo general, accidentes de baja probabilidad de alto grado de exposición y de graves consecuencias; efectos agudos inmediatos. El tiempo de respuesta es crítico; relaciones de causa-efecto evidentes. El enfoque está en la seguridad humana y la prevención de pérdidas, básicamente dentro de los límites del centro de trabajo.
2. Riesgos de salud: Por lo general, alta probabilidad de exposiciones de bajo nivel, bajas consecuencias, periodo latente prolongado, efectos demorados. Las relaciones de causa-efecto no se establecen con facilidad. El enfoque está en la salud humana, básicamente fuera del centro o instalaciones del trabajo.
3. Riesgos ambientales: Efectos sutiles, múltiples interacciones entre la población, comunidades y ecosistemas (incluyendo cadenas alimentarias) en niveles micro y macro; gran incertidumbre en causa y efecto. El enfoque está en los impactos, en el hábitat y en los





ecosistemas que pueden presentarse a grandes distancias de las fuentes de preocupación.

4. Riesgos de bienestar público y buena disposición: Percepciones públicas y de la comunidad relativas al desempeño y los productos de una organización. Las preocupaciones por la estética, valores de la propiedad y las limitaciones en el empleo de recursos. El impacto negativo en las percepciones del público es inmediato; los cambios positivos son lentos. El enfoque está en percepciones y valores públicos.
5. Riesgos financieros: Riesgos a corto y largo plazos de pérdida de la propiedad o de los ingresos, exposición a responsabilidades, posibilidad de recuperación de seguros, utilidades en inversiones ambientales, de salud y de seguridad (EHS). El enfoque está en la operabilidad y la viabilidad financiera.

2.7.2.1 Medidas e indicadores de riesgos

A continuación se muestran ejemplos de medidas e indicadores de riesgos:

Indicadores de toxicidad aguda

LC₅₀, LD₅₀

Concentración letal o dosis letal del 50% de organismos expuestos vía inhalación o ruta oral.

Riesgos de seguridad

Muertes, heridas, pérdida de días laborales

Daños en propiedades

Producción y ventas perdidas

Riesgos para la salud (subcrónicos/crónicos)

Casos de cáncer en incremento





Peligros no cancerosos (efectos respiratorios, neurológicos y reproductivos)

Riesgos ambientales

Abundancia y diversidad de especies (poblaciones)

Alteraciones al hábitat y ecosistema (función, capacidad)

Daño a los recursos naturales (NRD)

Bienestar público/riesgos de buena voluntad

Restricciones al uso de recursos (por ejemplo, aguas subterráneas)

Olores molestos, perjuicios a la visibilidad, estética

Valor de propiedades

Riesgos financieros

Seguros (costo, capacidad de recuperación)

Responsabilidad (a corto y largo plazo)

Ingresos ("franquicia de consumo")

La razón fundamental de la evaluación de riesgos es decidir la necesidad y la naturaleza del control de riesgo.

Las ventajas de la evaluación de riesgos, son que los criterios de riesgos proporcionan un marco de referencia efectivo para dar prioridades a los problemas, asignar recursos y reducir riesgos. A partir de los resultados de los análisis de riesgos se pueden asignar recursos para la prevención, remedio o control de riesgos.

Las evaluaciones de riesgos pueden utilizarse en una gran variedad de situaciones, por ejemplo:

- Evaluar los costos y beneficios de los reglamentos existentes y propuestos.





- Realizar un análisis de las condiciones de operación de una instalación de proceso para determinar la necesidad de acciones correctivas.
- Evaluar tecnologías existentes y nuevas para una prevención efectiva, control o mitigación de peligros y riesgos.
- Proporciona una base para la reducción de riesgos desde una perspectiva global y para la puesta en marcha de un programa de administración.

La evaluación de riesgos se emplea para señalar los puntos débiles en el diseño y operación del proceso que pudieran guiar a fugas accidentales, incendios o explosiones.

2.7.3 Metodologías de evaluación de peligros⁽¹⁸⁾

2.7.3.1 Inspección de seguridad (Safety Review)

Es un método que busca identificar condiciones de la planta o procedimientos de operación que puedan provocar accidentes con pérdidas significativas. Estas revisiones se efectúan durante el diseño. Los resultados son la evaluación del proceso desde el punto de vista de varios especialistas en áreas como la seguridad, la salud y la protección ambiental. Al incorporar varios puntos de vista el análisis se enriquece.

2.7.3.2 Jerarquización relativa

Se tiene como objetivo determinar las áreas u operaciones más significativas con relación a su peligro. El estudio permite a los especialistas la comparación de atributos de diferentes procesos y actividades para determinar si tienen características peligrosas que necesitan un estudio posterior, atribuyéndoles valores numéricos (índice) representando su grado de peligrosidad.

- El Dow Fire and Explosion se emplea en instalaciones donde se trabaja con sustancias explosivas o inflamables, evaluando la existencia de peligros de incendios y/o explosiones.





- El Mond Index similar en muchos aspectos al índice Dow, incluye además aspectos de toxicidad de las sustancias.
- El Substance Hazard Index evalúa la tendencia de las sustancias para dispersarse en el aire si son liberados, afectando a las personas.

Se pueden generar operaciones matemáticas que sean sensibles a las variables del proceso tomando en cuenta las propiedades de los materiales, las condiciones del proceso, las características de diseño y construcción y actividades de operación.

2.7.3.3 Evaluación Preliminar de Peligros (Preliminary Hazard Analysis)

El propósito principal de este método es el reconocimiento temprano de los peligros. Se realiza principalmente en las primeras etapas del desarrollo de una planta y consiste en desarrollar una lista de peligros relacionados con todas las partes que constituyen el proceso.

2.7.3.4 ¿Qué pasa sí? (What if Analysis)

El éxito de su aplicación depende de la experiencia de los analistas y de la información de la planta. El objetivo es analizar cuidadosamente el resultado de eventos inesperados que podrían producir consecuencias adversas, dividiendo por áreas los sistemas de estudio y examinando sus posibles desviaciones, incluyendo las variaciones en el diseño, construcción, modificaciones y operación del sistema.

El resultado de este análisis es una tabla que contiene las posibles y creíbles desviaciones encontradas al contestar la pregunta ¿Qué pasa sí? así como sus consecuencias y peligros, medidas de seguridad y recomendaciones.

2.7.3.5 ¿Qué pasa sí?/Lista de verificación (What if /Checklist Analysis)

Esta metodología combina la creatividad del ¿Qué pasa sí?, con el orden y estructura de la lista de verificación. Se emplea para analizar los efectos





potenciales y significativos de accidentes de una manera general. Esta técnica da como resultado una lista de las áreas con problemas dentro del proceso estudiado y una tabla que contiene las posibles y creíbles desviaciones del sistema, así como sus consecuencias o peligros, medidas de seguridad y recomendaciones.

2.7.3.6 Análisis de riesgos y operabilidad (HazOp Analysis)

Busca examinar de manera sistemática toda posible desviación de las condiciones de operación, buscando las causas y posibles consecuencias de cada desviación. Este análisis debe ser realizado por un grupo multidisciplinario de personas con experiencia en las diferentes áreas (operación, mantenimiento, instrumentación y seguridad).

El estudio se centra en puntos específicos del proceso y operación, llamados nodos de estudio y se realiza aplicando la combinación de una serie de palabras guía con parámetros de proceso que sean aplicables al objeto de estudio. Los resultados se expresan de forma tabular anotando el número de identificación del equipo o línea, la desviación (palabra guía + variable de proceso), causas, consecuencias, mecanismos de protección existentes o recomendados y las acciones para corregir la falla.

2.7.3.7 Análisis de Efectos del Modo de Falla (FMEA Failure Mode and Effect Analysis)

El objetivo de esta metodología es evaluar las formas en que los equipos pueden fallar (o ser operados inadecuadamente) y sus consecuencias para el proceso, identificando las fallas individuales que pueden contribuir o conducir a un accidente. El analista debe elaborar una lista de todos los modos de falla que pudiesen presentar cada componente (válvulas, bombas, línea, etc.) de los sistemas, y considerar las situaciones (incrustaciones, taponamiento, falta de mantenimiento, etc.) que alteren la operación normal. El resultado es una tabla





donde se listan los componentes con su número de identificación los posibles modos de falla, el o los efectos de la falla, los mecanismos de protección y las acciones recomendadas.

2.7.3.8 Análisis de Árbol de fallas (FTA Fault Tree Analysis)

Es un modelo gráfico cuyo objetivo es describir la secuencia de una falla específica, llamada evento culminante (Top Event). Ésta se compone por la combinación de fallas y errores que pueden ser eventos intermedios o secundarios y eventos primarios.

Falla se define como la disfunción de un componente que necesita ser reparado para funcionar normalmente otra vez; error es el mal funcionamiento a causa de una falla, que deja de ser si esta se corrige. Existen fallas y errores primarios, secundarios y de comando. Los primarios se deben al mal funcionamiento de componentes cuando se operan en condiciones de diseño; los secundarios se deben a operaciones fuera de las condiciones de diseño; de comando cuando la función del componente es distinta a lo esperado. Los eventos primarios son la base del árbol y no necesitan mayor desarrollo. Los eventos secundarios son todas aquellas combinaciones de eventos intermedios entre el evento culminante y los eventos primarios. Todos los eventos están relacionados entre sí a través de puertas lógicas.

2.7.3.9 Análisis de Árbol de Eventos (ETA Event Tree Analysis)

Es un proceso inductivo de razonamiento, donde el analista comienza con un evento iniciador y desarrolla las posibles secuencias de eventos que conlleven a un accidente potencial, considerando el éxito o fracaso de los mecanismos de seguridad conforme avanza el accidente.

El estudio pretende dar una secuencia lógica y cronológica de éxitos o fracasos, que expliquen el origen de una situación dada. Una vez armado el árbol,





se puede calcular su conjunto mínimo de corte, que consiste en los acontecimientos mínimos necesarios para llegar a una consecuencia.

2.7.3.10 Análisis Causa-Consecuencia (Cause-Consequence Analysis)

Esta metodología combina las características del razonamiento inductivo del análisis de eventos, con las características del razonamiento deductivo del árbol de fallas, dando como resultado una técnica gráfica que relaciona las consecuencias específicas de un accidente con sus posibles causas. La desventaja de este método es que no se puede desarrollar para sistemas complejos, debido a que la combinación de diagramas es difícil de manejar.

2.7.3.11 Análisis de Fiabilidad Humana (Human Reliability Analysis)

El objetivo de esta técnica es estudiar los factores que dan forma al comportamiento humano, tales como: estrés, condición emocional, capacitación, experiencia, jornada de trabajo, ambiente de trabajo, procedimientos entre otros. La idea de este estudio es encontrar las fallas en la interfase hombre-máquina, para poder analizarlas con referencia a las necesidades, habilidades y limitaciones de las personas y reducir la probabilidad de ocurrencia de los errores humanos.

2.8 Análisis de Consecuencias⁽¹⁹⁾

Tras la identificación de un evento no deseado deben ser evaluadas las consecuencias. El análisis de consecuencias es específico al sitio donde se encuentra la planta y debe considerar el tipo de materiales peligrosos involucrados, la localización, la densidad de población aledaña y los patrones de clima prevaleciente. Se deben considerar las consecuencias a la salud como los efectos económicos.

- Para explosiones se debe calcular los radios de la onda de sobrepresión.
- Para fuegos se debe calcular los radios de la bola de fuego y los valores de





la radiación térmica contra distancia.

Un modelo de dispersión exacto o una simulación que se ajuste a la realidad es muy difícil. La dispersión atmosférica no es reproducible en el laboratorio y aun más difícil es reducirla a términos analíticos.

Los métodos cuantitativos y modelos matemáticos de simulación ayudan a los analistas y a la gerencia de la instalación industrial a determinar la importancia relativa de cada uno de los eventos no deseados identificados y esto permite la toma de decisiones sobre la inversión de recursos de forma más eficiente para la reducción de riesgos.

Algunos ejemplos del uso de los análisis de consecuencias se mencionan a continuación:

- Determinación de la localización óptima de una instalación industrial
- Determinación de los parámetros de diseño de equipo
- Toma de decisiones para el plan de respuesta a emergencias
- Cumplimiento de estándares corporativos
- Cumplimiento regulatorio

Los accidentes en las plantas químicas o instalaciones industriales presentan características similares como son: derrames o fugas de sustancias químicas tóxicas, inflamables o explosivas.

Los accidentes comienzan con un incidente que frecuentemente resulta en la pérdida de contención de material involucrado en el proceso, ejemplo de situaciones que conllevan a la pérdida de contención son: la ruptura de una tubería, un orificio en un tanque o en una tubería, una reacción fuera de control, fuego externo a los contenedores, etc. Para la estimación de las consecuencias de este y otro tipo de accidentes se han desarrollado modelos de estimación dependiendo de los resultados buscados.





2.8.1 Clasificación de los modelos de estimación de consecuencias

Los modelos de estimación de consecuencias se clasifican de la siguiente forma:

1. Modelos de fuente
2. Modelos de dispersión
3. Modelos de explosiones e incendios
4. Modelos de efecto

Una vez que el incidente ha ocurrido, se seleccionan los modelos de fuente para describir como son descargados los materiales del proceso a la atmósfera, estos modelos proporcionan el gasto de la descarga, la cantidad total descargada (o tiempo total de la descarga) y el estado de agregación de la sustancia liberada (sólido, líquido, gas/vapor). Un modelo de dispersión se usa posteriormente para describir el comportamiento del material a través de su trayecto en la atmósfera y la concentración del mismo en función de la distancia que recorre y el tiempo a partir de la emisión. Para el caso de emisiones de sustancias inflamables, los modelos de fuego y explosión convierten la información en potencial de daño como radiación térmica y ondas de sobrepresión. Por último los modelos de efecto convierten los resultados de los modelos anteriores en daños a la gente (lesiones o muertes), a las estructuras y al medio ambiente.

2.8.1.1 Modelos de fuente

Después de seleccionar el escenario a analizar, los modelos de fuente se utilizan para determinar cuantitativamente las consecuencias de una emisión a través de la estimación del gasto de la emisión, la cantidad total emitida o duración de la emisión, el estado de agregación de la sustancia, la fracción de sustancia evaporada a partir de un derrame y la formación de aerosoles. Los modelos de fuente son modelos matemáticos obtenidos de ecuaciones fundamentales o





empíricas que representan los procesos físico-químicos durante la emisión de las sustancias.

Para la aplicación de los modelos fuente es necesario contar con información del accidente a analizar:

1. Estado de agregación, condiciones de presión y temperatura.

Los líquidos pueden estar almacenados bajo presión, por lo que su temperatura de ebullición puede estar por debajo de la temperatura ambiente dando lugar a una evaporación súbita formando una nube de aerosol, o su temperatura de ebullición puede estar por arriba de la temperatura ambiente produciendo charco o alberca de líquido y dependiendo de su presión de vapor podrá generar o no nubes de vapor.

2. Condiciones finales y la ruta termodinámica.

Se requiere para conocer el desarrollo de la emisión.

3. Tamaño del orificio

Debe ser estimado o conocido, dependiendo de su causa. Algunos autores proponen valores de 2 ó 4 pulgadas sin importar el tamaño de la tubería.

4. Duración de la emisión

El tiempo de duración de la emisión depende de los tiempos de detección y acción de los sistemas de seguridad y del tiempo de respuesta de los operadores. Otros aspectos a considerar serían régimen transitorio de la emisión generalmente cambia conforme disminuye la presión; restricciones al flujo como válvulas, reducciones y otros accesorios; material acumulado en tuberías o equipo que pudiera tener efectos adicionales a la emisión como golpe de ariete, etc.





2.8.1.2 Modelos de dispersión

Los modelos de dispersión son modelos matemáticos que describen el comportamiento de los materiales tóxicos y/o inflamables transportados por el aire desde el lugar de la emisión o fuente a lo largo de la instalación o a la comunidad vecina. Los resultados de los modelos de dispersión son: área de afectación y la concentración de la sustancia en función de la distancia y tiempo transcurrido.

El potencial de daño de la emisión frecuentemente se mide en función de la concentración y se obtienen isopleas (curvas de concentración constante) que se pueden graficar en diagramas o mapas de la zona afectada.

Todos los peligros que conllevan los accidentes con sustancias químicas no son solamente función de la concentración de la sustancia, pueden ser también función de situaciones como las siguientes:

- Tiempo de exposición
- Respuesta biológica del individuo
- Desplazamiento del oxígeno y potencial de asfixia
- Límites de inflamabilidad de las sustancias y las fuentes de ignición presentes
- Limitaciones en la visibilidad por la formación de una nube
- Radiación térmica de las sustancias que se inflamen

Las emisiones que son de forma continua como la proveniente de una chimenea o de una fuga por un pequeño orificio, forman una pluma de la(s) sustancia(s) emitida(s) de forma regular, larga y delgada, cuyo comportamiento está en función de las condiciones atmosféricas y de las características del gas relativas a su flotación con respecto al aire.

Las emisiones que son de forma instantánea tienen la forma de una sola nube de vapor/gas conocida como "puff ". Estas emisiones se mueven también en





función de las condiciones atmosféricas y viajan como un solo bloque hasta su completa dilución y dispersión.

Los modelos de simulación de dispersión de nubes tóxicas/inflamables necesitan como mínimo la información del gasto o la cantidad del material emitido y de las condiciones atmosféricas que afectan la dispersión. Estas condiciones son las siguientes:

1. Velocidad del viento

La velocidad del viento es el factor por el cual una nube de gas tóxico/inflamable puede ser trasladada y diluida. A medida que la velocidad del viento se incrementa, la sustancia se diluye con mayor velocidad.

2. Estabilidad atmosférica

Las condiciones climatológicas tienen una gran influencia sobre la dispersión de las sustancias. La estabilidad atmosférica se relaciona con el mezclado vertical del aire. La estabilidad atmosférica normalmente se clasifica de acuerdo al modelo de Pasquill-Grifford, donde se establecen seis clases de estabilidad (A-F) dependiendo de la velocidad del viento y la cantidad de radiación solar (ver tabla 2.6).

A falta de información precisa, existen dos combinaciones comunes que son utilizadas por los analistas al evaluar las consecuencias: Estabilidad D con una velocidad del viento de 5 m/s y estabilidad F con una velocidad del viento de 1.5 m/s. Estas combinaciones describen escenarios donde la turbulencia y velocidad de mezclado es baja y por lo tanto la dispersión es lenta, esto quiere decir, que se considera el peor escenario posible pues se trata de una nube con una concentración alta desplazándose lentamente en la dirección del viento.





3. Condiciones de la superficie o terreno

Las condiciones del terreno afectan el comportamiento de mezclado del aire a diferentes alturas con respecto al suelo y por lo tanto de las nubes de gases tóxicos/inflamables. Las estructuras y árboles aumentan el mezclado, mientras superficies llanas sin construcciones lo disminuyen.

4. Altura del punto de la emisión

La altura del punto de emisión es un factor que en combinación con la característica de flotación del gas, interviene en la cantidad de sustancia que se puede encontrar en la superficie del terreno.

5. Momentum y comportamiento del material frente al aire

Los gases pueden comportarse de tres diferentes formas de acuerdo a sus características de flotación. Esto es, los gases pueden tener una flotación negativa si son más densos que el aire, una flotación positiva si son menos densos que el aire o una flotación neutra para gases con densidad similar a la del aire.

Los diferentes escenarios posibles en la dispersión de una nube tóxica/inflamable, pueden ser estimados a través de una combinación de los factores anteriores (tabla 2.4).

2.8.1.3 Modelos de explosiones e incendios⁽²⁰⁾

Las explosiones se clasifican como detonaciones o deflagraciones. En una detonación el frente de llamas toma la forma de una onda de choque a una velocidad mayor a la del sonido o supersónica, el aumento de la presión es casi instantáneo y puede alcanzar hasta 20 veces la presión original. En una deflagración, se genera combustión rápida a una velocidad menor a la del sonido o subsónica, con un aumento de presión de 8 a 10 veces la inicial.





Tabla 2.4 Tipo de estabilidad basado en la velocidad del viento y la radiación solar.

Velocidad del viento en la superficie (m/s)	Día			Noche	
	Nivel de radiación solar			Nubosidad	
	Elevada	Moderada	Baja	Mas del 50%	Menos del 50%
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

A: Condiciones extremadamente inestables
B: Condiciones moderadamente inestables
C: Condiciones ligeramente moderadas

D: Condiciones neutras
E: Condiciones ligeramente estables
F: Condiciones moderadamente estables

La diferencia más significativa entre los incendios o fuegos y las explosiones es la cantidad de energía liberada. Los incendios liberan energía lentamente, mientras que las explosiones lo hacen muy rápidamente en el orden de microsegundos. Los incendios pueden resultar en explosiones y las explosiones en incendios.

2.8.1.3.1 Tipos de explosiones

Las explosiones dependen de una serie de parámetros tales como: la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la composición del material, las propiedades físicas del material, la geometría de los alrededores (espacios abiertos o confinados), la cantidad del material involucrado, el tiempo transcurrido antes de la ignición, etc. Lo anterior, hace al comportamiento de las explosiones difícil de explicar y que los modelos matemáticos de éstas tengan ciertas incertidumbres.





La onda de sobrepresión se debe a la expansión de los gases por la reacción. Esta expansión puede ser causada por los efectos estequiométricos (cambio en el número total de moles) o los efectos térmicos.

Los efectos de las explosiones se pueden dividir en tres: ondas de sobrepresión, formación de proyectiles y radiación térmica.

Los tipos de explosiones que se pueden presentar son las siguientes:

1. Explosiones de nubes de vapor no confinadas. (UVCE Unconfined Vapor Cloud Explosion)
2. Explosiones de nubes de vapor confinadas (CVCE Confined Vapor Cloud Explosion)
3. Explosiones por la expansión de líquido en ebullición (BLEVE Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion)
4. Explosiones físicas.

2.8.1.3.2 Tipos de incendios

El fuego es una reacción química que necesita de tres componentes para llevarse a cabo: combustible, comburente u oxidante y una fuente de ignición o energía.

Los tipos de escenario que se pueden presentar debido a una fuga o derrame de una sustancia química inflamable son los siguientes:

1. Ráfaga de fuego (Flash Fire)
2. Bola de fuego (Fire Ball)
3. Chorro de fuego (Jet Fire)
4. Incendios o fuego de charcos (Pool Fire)





2.8.1.4 Modelos de efectos

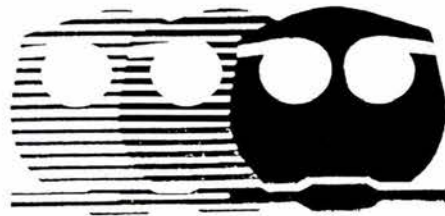
Una vez estimados los efectos de un accidente, radiación térmica u onda de choque, debemos evaluar sus efectos, esto es, realizar una estimación de lo que pasará cuando estos efectos actúen sobre las personas, el ambiente, los edificios o los equipos, etc. Estas estimaciones suelen reportarse como una serie de valores tabulados o gráficos indicando los radios de fatalidad. Cuando se incluyan sustancias tóxicas se deben reportar las áreas afectadas por concentraciones peligrosas a los seres humanos.



El riesgo está inherente en el compromiso de recursos actuales hacia expectativas futuras. La meta principal ... debe ser el permitir que los negocios asuman el riesgo correcto.

Peter Drucker

CAPÍTULO 3



Trabajo en Campo



3. TRABAJO EN CAMPO

En el trabajo de campo se llevó a cabo la actualización de Diagramas de Tubería e Instrumentación (DTI's) de la planta. Este trabajo se realiza recorriendo la planta y observando cada uno de los equipos, instrumentación y tuberías, haciendo una comparación de lo observado contra los DTI's de diseño, de esta forma se realizan los cambios de actualización. Teniendo los diagramas actualizados se puede llevar a cabo la evaluación para el análisis de riesgos, para así controlar y reducir los riesgos.

A continuación se dará una descripción del proceso de la Planta Recuperadora de Azufre.

3.1 Descripción del proceso⁽¹⁹⁾

La planta esta compuesta por dos trenes de producción de azufre, con equipo en común, a continuación se describe los componentes de uno de los trenes y del equipo en común, así como las operaciones unitarias que se presentan en cada uno de los equipos en particular. El proceso inicia en el tanque separador de gas ácido 101-V, el cual es un recipiente cilíndrico horizontal que cuenta con una bota en la parte inferior. Este recipiente es común para los dos trenes y sirve para separar los líquidos acuosos y orgánicos principalmente que pudiera traer la corriente de gas ácido (Anexo B, diagrama A-301-1).

Los líquidos son retornados al límite de baterías para su tratamiento a través de la bomba 101-P/PA.

El gas ácido, libre de los residuos líquidos es alimentado a cada uno de los reactores térmicos de cada tren. Cada tren esta compuesto por los siguientes equipos que describiremos a continuación:

El reactor térmico 101-R es el primer equipo donde se lleva a cabo la reacción principal para la producción de azufre y es esencialmente donde se





produce el proceso Claus. Este reactor esta compuesto por un recipiente cilíndrico horizontal recubierto con ladrillo refractario y un quemador en un extremo y en el otro tiene conectado una caldera de recuperación (Anexo B, diagrama A-301-2).

Las corrientes que son alimentadas a este equipo son: gas ácido y aire con las cuales se produce la siguiente reacción más importante para la producción de azufre:

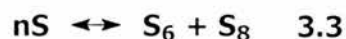


Además de producirse otras reacciones colaterales en la combustión del gas ácido. Pero no todo el H_2S contenido en la corriente de gas ácido es convertido a SO_2 , oxidándose una tercera parte únicamente, esto se logra quemando la corriente de gas ácido con déficit de aire. Posteriormente se hace reaccionar dos moles de H_2S con una de SO_2 para producir azufre elemental en el mismo reactor siguiendo la siguiente reacción:



En este momento ya contamos con la presencia de azufre elemental, recuperándolo de la fase gaseosa y enfriándolo al pasar por una caldera de recuperación de calor 101-EX, en la cual se genera vapor de media presión saturado aprovechando la gran cantidad de calor generado por la reacción exotérmica y por otro lado enfriando la corriente gaseosa.

Este equipo es un cambiador de calor coraza y tubos de un solo paso por ambos lados, cuenta con un espacio vapor para su separación del lado de la coraza, así como un separador de gas líquido del lado de los tubos para prever una posible condensación de azufre pero si prevé dicho fenómeno por razones físicas. En la caldera de recuperación se lleva a cabo la siguiente reacción:



Además de la generación de vapor saturado a media presión. Posteriormente la corriente gaseosa se pasa por el primer condensador de azufre 102-EX (Anexo B,





diagrama A-302-1), equipo en el cual todo el azufre formado es condensado hasta su punto de equilibrio, este equipo tiene las mismas características físicas que la caldera de recuperación excepto que este genera vapor saturado de baja presión. El azufre condensado es separado en el cabezal de salida y enviado a la fosa de azufre por medio de un sello de azufre que evita el escape de los gases ácidos remanentes.

Hasta aquí se ha descrito lo que el proceso Claus tradicional, a continuación describiremos los equipos que componen el proceso Claus catalítico o Claus modificado. Los gases provenientes de primer condensador de azufre aún contienen cantidades importantes de H_2S y SO_2 que se pueden recuperar o más bien dicho no se pueden enviar a la atmósfera. Por tal motivo ésta corriente se hace reaccionar en un lecho catalítico.

Desafortunadamente la reacción en el lecho catalítico requiere que la corriente gaseosa sea introducida a una temperatura específica que está por encima de la temperatura a la que salen estos gases del condensador de azufre, es entonces por lo que es necesario hacerlos pasar por un recalentador y elevar su temperatura. Este equipo 102-H es un calentador a fuego directo con un cuerpo cilíndrico horizontal y cuenta con un quemador de gas ácido integrado al cuerpo, la corriente de proceso, es expuesta directamente a la flama del quemador logrando de esta forma la elevación de la temperatura y de esta forma alcanzar las condiciones que requiere el convertidor catalítico (Anexo B, diagrama 302-1).

El convertidor catalítico 102-R (Anexo B, diagrama 302-2) es un recipiente horizontal compuesto por tres compartimientos independientes cada uno, cada compartimiento contiene un lecho catalítico de alumina activada y sus paredes de cada compartimiento están recubiertas con concreto refractario para prevenir la corrosión del equipo ya que la reacción que se lleva a cabo en su interior es exotérmica y altamente corrosiva.





La reacción que se efectúa en el primer compartimiento del convertidor catalítico es la siguiente:



El azufre formado en el convertidor catalítico se encuentra en fase gaseosa y ésta corriente gaseosa es introducida a un segundo condensador de azufre 103-EX que tiene las mismas características físicas y la misma finalidad que el primer condensador de azufre (Anexo B, diagrama 302-2).

La corriente gaseosa aún contiene cantidades importantes de H_2S y SO_2 , motivo por el cual el proceso se repite en dos etapas más, por un recalentador de gas 103-H (Anexo B, diagrama 302-2), por el segundo compartimiento del convertidor catalítico y un tercer condensador de azufre 104-EX (Anexo B, diagrama 303-2), por el tercer compartimiento del convertidor catalítico y un cuarto condensador de azufre 105-EX (Anexo B, diagrama 303-1). Este último equipo precalienta agua en lugar de generar vapor, agua que será alimentada a los otros condensadores.

Como etapa final en la recuperación de azufre, la corriente gaseosa se hace pasar por un coalescedor de azufre, con la finalidad de atrapar las partículas de azufre que pudiera traer dicha corriente y ser enviadas a la fosa de azufre a través de su sello correspondiente.

Por último la corriente gaseosa conteniendo H_2S y SO_2 que no es posible ya de recuperar por limitaciones del tipo de proceso empleado, es enviado a un incinerador 101-H, que con ayuda de un combustible y aire, todo el H_2S remanente es transformado a SO_2 y enviado a la atmósfera a una altura aproximada de 50 metros a través de la chimenea 102-L. Tanto el incinerador como la chimenea son equipos comunes para los dos trenes.





3.2 Técnicas utilizadas en el Análisis de Riesgos

3.2.1 Análisis HazOp (Hazard and Operability Analysis)

Como ya se vio en el capítulo anterior el análisis HazOp involucra una revisión sistemática de los documentos que describen una instalación. El estudio se realiza por un equipo multidisciplinario, cuyo objetivo es evaluar los peligros para así identificar los riesgos o problemas en la operación (operabilidad) de la planta que pudieran producir un accidente. Se emplean palabras guías aplicadas a parámetros claves para buscar desviaciones a las condiciones de diseño (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Palabras guía y parámetros de proceso

Palabra guía	Significado	Parámetros de proceso	Ejemplos de desviación
No	Negación de la intención	Temperatura Presión Nivel Reacción Composición Flujo Tiempo Viscosidad Mezcla Adición Separación pH	No flujo
Más	Incremento cuantitativo		Mas temperatura
Menos	Disminución cuantitativa		Menos(bajo) nivel
También como	Incremento cualitativo		Presencia de elementos no esperados (impurezas)
Parte de	Disminución cualitativa		Se logra la intención de diseño en forma parcial (mezcla no homogénea)
Inverso	Opuesto a la intención		Flujo inverso
Otro que	Sustitución completa		En lugar del efecto deseado, ocurre algo distinto. Aumento del pH en vez de disminuir

Los estudios de peligros y operabilidad se basan en la suposición que la mayoría de los problemas pasan inadvertidos debido a la complejidad del proceso y no por la falta de conocimientos por parte del equipo de diseño.





El análisis HazOp es una técnica simple y estructurada para identificar peligros a través del pensamiento creativo. Es una herramienta útil y poderosa cuando se emplea adecuadamente.

El estudio se emplea para:

- a) Analizar donde pueden surgir problemas potenciales y ser un vehículo para posteriores recomendaciones al diseño de la planta o a los procedimientos de operación.
- b) Proporcionar documentación relativa a la seguridad a cada nivel de operadores de acuerdo a sus tareas y responsabilidades.
- c) Durante modificaciones o ampliaciones a plantas existentes, puesto que cambios al diseño pueden producir problemas no obvios a menos que se revise como parte de un sistema.
- d) Durante la operación, para evaluar detenidamente mejoras al proceso con el fin de asegurar la calidad.

Si se lleva a cabo un estudio y las modificaciones planteadas son implementadas para reducir riesgos, entonces la instalación deberá operar a un nivel de riesgo menor al que se hallaba antes de realizarse dicho estudio.

El análisis HazOp parte de la base que el proceso no tiene peligros inherentes o problemas de operación, si éste opera conforme a diseño, de acuerdo a los DFP's (Diagramas de Flujo de Proceso), especificaciones de equipo y procedimientos de operación, esto es, sino se presentan desviaciones no hay problemas en el funcionamiento de la planta.

Los participantes de la sesión tienen que ser:

Facilitador o líder

Debe contar con experiencia en la aplicación de la técnica, mediar discusiones y estimular la generación de ideas.





Ingeniero de procesos

Conocimiento de los DTI's.

Operador de la planta

Conocimiento de las instalaciones y condiciones de proceso.

Apoyo: Ingeniero de instrumentos

Ingeniero eléctrico

Ingeniero de seguridad

Elementos del personal de mantenimiento (estático y dinámico).

Secretario

Es importante mantener el número de personas limitado de 5 a 7 integrantes para asegurar que todos puedan participar. Es deseable que cada uno de los participantes se comprometa a asistir a todas las sesiones del análisis. La asistencia ocasional de personas suplentes a menudo no resulta adecuada. El firme compromiso por parte de los departamentos involucrados para la asignación de tiempo es necesario para el adecuado desempeño del estudio.

Acciones previas al estudio:

- Recopilación de información (DTI's, DFP's, descripción del proceso, procedimientos, manuales de operación, información de materiales SMDS).
- Verificar la concordancia entre los diagramas de construcción (as built) con lo encontrado en inspección en campo.
- Asegurar un medio para registrar lo dicho en las sesiones (computadora u otra herramienta).

El éxito de un estudio HazOp depende de la exactitud y extensión de la información disponible. Al desarrollar el estudio puede surgir la necesidad de revisar los procedimientos de operación desde un punto de vista crítico en vez de usarlos sólo como documentos de apoyo.





En algunas ocasiones la extensión de la planta o área de proceso hace necesaria dividir ésta en nodos o circuitos delimitados para una mejor comprensión de la intención de diseño. Un nodo debe ser lo suficientemente grande para ser significativo. Antes de empezar a tratar un nuevo nodo, es conveniente hacer un resumen de la función o etapa del proceso, junto con sus variables de operación normales, para asegurar que todos los integrantes tienen el conocimiento básico de la intención de diseño.

Los pasos a seguir durante el estudio pueden resumirse como sigue:

- a) Búsqueda de problemas potenciales
 - 1) Causa (¿Qué lo origina?)
 - 2) Desviación: involucra las palabras guía (no, más, menos, otro que, etc.)
 - 3) Consecuencias
- b) Evaluación semi-cuantitativa dada por la frecuencia y la gravedad de ocurrencia de las consecuencias.

Tabla 3.2 Nivel de riesgo con respecto a la frecuencia

Nivel	Frecuencia
1	Ocurre mas de una vez al año
2	Ha ocurrido varias veces durante la vida de la planta
3	Se espera que ocurra no mas de una vez en la vida de la planta
4	No se espera que ocurra en la vida de la planta

Los problemas potenciales considerados, esto es, las consecuencias de las desviaciones deben ser evaluadas conforme vayan surgiendo, asignándoles por medio de índices la severidad y frecuencia para conformar una matriz de riesgos. Esto se efectúa en dos ocasiones, la primera sin considerar protecciones o





3. Trabajo en campo.

salvaguardas, la segunda tomando en cuenta los programas de mantenimiento preventivo, las protecciones, las medidas de control y respuesta a emergencias.

Tabla 3.3 Nivel de riesgo con respecto a la gravedad.

Escala	Gravedad	Aspecto	Descripción
1	Catastrófico	Personas	Pérdida de una o más vidas fuera de la refinería
		Instalaciones	Daños por más de \$25,000,000
		Medio ambiente	Fuga mayor que requiere limpieza fuera de la refinería
		Operación	Paro de la refinería
2	Mayor	Personas	Un lesionado fuera de la refinería y una pérdida de vida dentro de la refinería.
		Instalaciones	Daños por un monto entre \$2,500,000 y \$25,000,000
		Medio ambiente	Fuga mayor que no requiere limpieza fuera de la refinería
		Operación	Paro de más de una planta
3	Significativo	Personas	Varios lesionados dentro de la refinería
		Instalaciones	Daños por un monto entre \$250,000 y \$2,500,000
		Medio ambiente	Fuga menor que requiere limpieza dentro de la refinería
		Operación	Paro de una planta
4	Importante	Personas	Un lesionado dentro de la refinería
		Instalaciones	Daños por menos de \$250,000
		Medio ambiente	Fuga menor
		Operación	Paro de equipo o sección de planta

Los niveles de frecuencia y gravedad se combinan en una matriz de riesgos la cual permite clasificar y jerarquizar las recomendaciones relacionadas con cualquiera de las desviaciones. Estas clasificaciones son de tipo A, B, C y D y se jerarquizan de la siguiente forma:

Clase A: El grado de riesgo clase A tiene muy alta prioridad. Esto significa que es necesaria una acción inmediata para eliminar o minimizar la ocurrencia del incidente ó mitigar su consecuencia.





Clase B: El grado de riesgo clase B tiene alta prioridad. La recomendaciones orientadas a minimizar el riesgo de esta clase se deben atender, sin embargo no es necesario que se atiendan inmediatamente, es decir que se pueden programar.

Tabla 3.4 Matriz de riesgos

F R E C U E N C I A	G R A V E D A D			
	1	2	3	4
1	A	A	B	C
2	A	B	C	D
3	B	C	D	D
4	C	D	D	D

Clase C: El grado de riesgo clase C tienen prioridad media. Significa que el riesgo puede minimizarse para mejorar la seguridad y operabilidad del área de estudio. El riesgo es aceptable, es decir que puede quedarse como está pero es necesario revisar las protecciones y garantizar que no fallarán en caso de que ocurra. Se dispone de un mayor periodo para atender las recomendaciones para minimizar esta clase de riesgos.

Clase D: El grado de riesgo clase D tiene baja prioridad. Esto quiere decir que la implantación de las recomendaciones sugeridas en el análisis mejora la seguridad pero el proceso puede seguir operando con seguridad aunque la recomendación no se implemente.

Las ventajas del estudio HazOp son las siguientes:

- Es fácil de aprender
- Puede ser adaptado fácilmente a casi cualquier operación efectuada dentro de la industria de proceso
- No requiere un grado de conocimiento avanzado por parte de los integrantes





Al finalizar el análisis HazOp tendremos las hojas donde se capturan las desviaciones, con sus respectivas causas, consecuencias y recomendaciones clasificadas de acuerdo a la matriz de riesgos. Estas recomendaciones se agrupan en relación a su clasificación, posteriormente son evaluadas por los responsables de la seguridad de la instalación y serán enviadas a la dirección para elaborar un plan de trabajo, donde se asignara(n) responsable(s) de llevar a cabo las acciones recomendadas y los tiempos de ejecución.

En el análisis HazOp de la planta recuperadora de azufre se analizaron 9 nodos con diferentes desviaciones, de estos 9 solo se seleccionaron 3. En el nodo 1 se analiza el tanque separador de gas ácido 101-V, en el nodo 2 el reactor térmico 101-R y en el nodo 7 el reactor catalítico 102-R. En el anexo C se muestra el estudio HazOp realizado.

3.2.2 Análisis de Árbol de Fallas (FTA Fault Tree Analysis)

La predicción de fallas de un equipo se realiza habitualmente de manera empírica, recogiendo datos de funcionamiento de un número representativo de equipos durante un tiempo suficientemente prolongado y ajustando estadísticamente las fallas observadas a una determinada distribución de probabilidad.

Un árbol de fallas es una representación lógica de las secuencias de acontecimientos que pueden llevar a un evento no deseado arbitrariamente elegido conocido como suceso culminante o evento tope, es una técnica cuantitativa de riesgos que nos proporciona la probabilidad ó la frecuencia. Cuando todas las secuencias razonables se han identificado y el árbol esta bien construido, el análisis FTA es posiblemente la herramienta más poderosa para la cuantificación de riesgos.

Los errores en la construcción y aplicación del árbol de fallas son de tipo cualitativo, surgen comúnmente por las siguientes causas:





- El sistema al que se aplica el análisis no se comprende bien por parte de los analistas. Esto produce frecuentemente omisiones en secuencias de sucesos importantes o construcción de secuencias erróneas.
- Se producen errores lógicos en la descripción de las fallas del sistema, obteniéndose evaluaciones cuantitativas incorrectas.
- Los fenómenos de fallas por causa común no se comprenden bien o se tienen en cuenta incorrectamente.

Durante el empleo del análisis FTA se distinguen 3 tipos de fallas de equipo:

- Fallas primarias ocurren cuando el equipo opera dentro de las condiciones para las que fue diseñado.
- Fallas secundarias se producen en condiciones para las que el equipo no fue diseñado; la falla no es atribuible al equipo sino a las perturbaciones excesivas en las condiciones de diseño.
- Fallas de control son aquellas donde el equipo cumple su función, pero en un tiempo equivocado o en una localización distinta a la esperada. La falla tampoco es atribuible al equipo, sino a la señal que recibe.

En un árbol de fallas normalmente las fallas primarias están en los extremos de las ramas, mientras las fallas secundarias y de control son eventos intermedios unidos a los anteriores y entre sí mediante puertas lógicas.

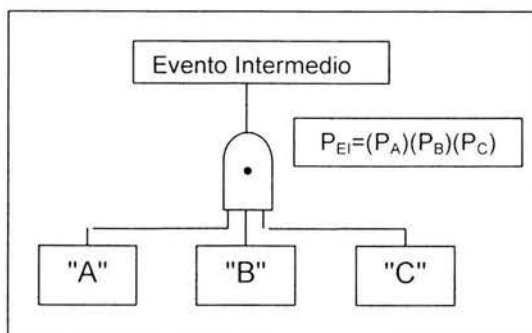


Fig. 3.1 Cálculo de probabilidades de la puerta Y

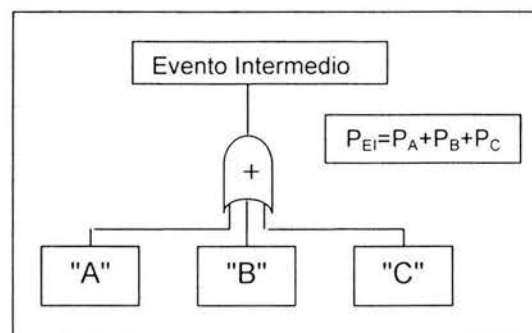


Fig. 3.2 Cálculo de probabilidades puerta O





3.2.2.1 Estimación cuantitativa de riesgos utilizando el Análisis de Árbol de Fallas por el método de conjuntos mínimos.

El árbol de fallas consiste en varios niveles de sucesos, conectados por puertas Y o puertas O. Las citadas conexiones lógicas suelen representarse utilizando el álgebra de Boole. Las reglas utilizadas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Reglas booleanas de uso frecuente en el Análisis de Árbol de Fallas.

Regla	Forma matemática
Conmutativa:	$A*B = B*A$ $A+B=B+A$
Asociativa:	$A*(B*C)=(A*B)*C$ $A+(B+C)=(A+B)+C$
Distributiva:	$A*(B+C)=A*B+A*C$ $A+(B*C)=(A+B)*(A+C)$
Idempotente	$A*A=A$ $A+A=A$
De la Absorción:	$A*(A+B)=A$ $A+(A*B)=A$

Se emplea entonces para el de árbol de fallas la técnica conocida como análisis de conjuntos mínimos (Minimal Cut Set Analysis) la cual consiste de una técnica matemática para manipular la estructura lógica del árbol de fallas e identificar así todas las combinaciones de eventos básicos los cuales inciden en el evento culminante, mediante el uso de las reglas algebraicas del álgebra booleana así la estructura lógica del árbol de fallas original es matemática y lógicamente equivalente a la estructura original solo que con una estructura mínima de conjuntos. El proceso de transformación abarca cualquier evento singular que aparezca repetidamente (fallas de causa común) en varias ramas o niveles del árbol, para reducirlo al mínimo.

El procedimiento consiste en ordenar la estructura del árbol de fallas de forma que podamos expresarla en términos de ecuaciones algebraicas booleanas, así el álgebra booleana es usada 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 va a quedar en términos de eventos básicos que serán posteriormente reestructurados en un nuevo árbol (árbol reducido), solo que este es equivalente al primero matemáticamente.

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" $P(A) \text{ o } P(B) = P(A) + P(B) - P(A) * P(B)$

Compuerta "Y" $P(A) \text{ y } P(B) = P(A) * P(B)$

Calculo de la Probabilidad.

$$P = 1 - e^{(-f*t)}$$

Donde: f = eventos/año; t = años

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 corte* (cut sets). Estos conjuntos, generalmente son susceptibles de simplificarse a un conjunto equivalente con un número menor de elementos denominados *conjuntos mínimos* (minimal cut sets).

El resultado final de un análisis de árbol de fallas es un valor de la probabilidad o frecuencia para el evento culminante. Este dato se combina con las estimaciones de consecuencias obteniéndose un valor para la EMP (Esperanza Matemática de Pérdidas). En principio los cálculos a efectuar en el análisis de riesgos terminan aquí, una vez establecido el intervalo de confianza para la cifra de frecuencia obtenida.

La EMP es el indicador que permite establecer la comparación entre el nivel de riesgo entre accidentes potenciales diversos.





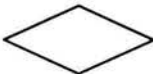




Cuando se habla de error humano como causa de un accidente suele entenderse que la falla tiene que ver con una acción errónea directamente relacionada con el accidente.

3.2.2.2 Simbología del Árbol de Fallas

La simbología utilizada para la elaboración del árbol de fallas se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Simbología para la elaboración de un Árbol de Fallas

Símbolo	Aplicación
	Sucesos intermedios: Resultan de la interacción de otro suceso, que a su vez se desarrollan mediante puertas lógicas.
	Sucesos Básicos: Constituyen la base de la raíz del árbol. No necesitan desarrollo posterior en otros sucesos.
	Sucesos no desarrollados: No son sucesos básicos y podrían desarrollarse más, pero el desarrollo no se considera necesario, o no se dispone de la suficiente información.
	Puertas "O": Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de uno o más sucesos de entrada para producir el suceso de salida.
	Puertas "Y": Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de todos los signos de entrada para producir el proceso de salida.

3.2.2.3 Criterio para la asignación de probabilidades a los eventos básicos en un Árbol de Fallas.

El criterio para asignar probabilidad a los eventos básicos en un árbol de fallas es el siguiente:



**Tabla 3.7 Criterios para asignar probabilidad.**

PROBABILIDAD (P)	FRECUENCIA PROBABLE (F)
1	Inminente (puede ocurrir en cualquier momento)
1×10^{-1}	Muy probable (ha ocurrido o puede ocurrir varias veces al año)
1×10^{-3}	Probable (ha ocurrido o puede ocurrir en un año)
1×10^{-5}	Poco probable (no se ha presentado en 5 años)
1×10^{-7}	Improbable (no se ha presentado en 10 años)
1×10^{-9}	No se ve probabilidad de que ocurra

3.2.2.4 Descripción de los escenarios para el Análisis de Árbol de Fallas

Se seleccionaron arbitrariamente dos escenarios para realizar Análisis de Árbol de Fallas, dichos escenarios son:

1. Daños a la chimenea 102-L por alta temperatura y
2. Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.

Tabla 3.8 Descripción del escenario de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.

ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS		
ESCENARIO DE ACCIDENTE	CAUSA / FUNDAMENTO	CONSECUENCIAS
1. Daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.	La chimenea 102-L puede tener daños por arrastre de hidrocarburos en los gases de cola, por falla en abierto de la válvula TV-1403 o por falla en cerrado de TV-1302.	El incremento en la temperatura en la chimenea puede causar daños a los internos de la misma así una probable fractura.

Los escenarios aquí descritos, son para mostrar la sucesión de causas que desencadenarían al evento culminante de un incendio o sobrepresión, se reviso el registro de incidentes y accidentes de la planta y no se han presentado incidentes ni accidentes de importancia.





Tabla 3.9 Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.

ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS		
ESCENARIO DE ACCIDENTE	CAUSA / FUNDAMENTO	CONSECUENCIAS
2. Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.	El metal base del reactor catalítico 102-R se perfora e incendia debido a la alta temperatura en éste, a la entrada de aire al reactor y a la presencia de H ₂ S.	Daños a la placa metálica base del reactor con un consiguiente paro de planta y contaminación ambiental.

3.2.2.5 Diagramas del Árbol de Fallas

Primero se construye el árbol de fallas considerando todas las posibles causas que pudieran llevar al evento culminante, después del tratamiento mediante conjuntos mínimos se construye el árbol de fallas reducido, y éste es equivalente al primero solo que en éste se han eliminado las causas de falla común. La tabla 3.10 muestra los diagramas representativos de cada uno de los Árboles de Fallas descritos anteriormente (Anexo D):

Tabla 3.10 Relación de diagramas de Árbol de Fallas.

DIAG. NUM.	NOMBRE
FTA-25	Análisis de Árbol de Fallas de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.
FTA-26	Análisis de Árbol de Fallas de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.

3.2.2.6. Calculo del Árbol de Fallas, con la técnica de conjuntos mínimos

3.2.2.6.1 Árbol de Fallas para los "Daños a la chimenea 102-L por alta temperatura"





3. Trabajo en campo.

Se describen los pasos del desarrollo del árbol de fallas mediante la formación de conjuntos de separación y finalmente llegar a la formación de conjuntos mínimos.

Nivel	Expresión booleana
1	$T=M1+M2+M3$
2	$T=(M4+B1)+(B2+M5+B3)+(B2+M5+M6)$
3	$T=(M7+M8+B4+B1)+(B2+B5+B6+B7+B3)+(B2+B5+B6+B7+B8+B9)$
4	$T=(B10+B11+B12+B13+B4+B1)+(B2+B5+B6+B7+B3)+(B2+B5+B6+B7+B8+B9)$

La ecuación del nivel cuatro se simplifica, y se obtiene:

$$T = (B1 + B4 + \sum_{i=10}^{13} Bi + B2 + B3 + \sum_{i=5}^9 Bi)$$

Con esta ecuación se construyen el árbol de fallas reducido y se calcula la probabilidad del evento culminante con los conjuntos mínimos.

Tabla 3.11 Cálculo de conjuntos mínimos y probabilidad de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.

Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia del conjunto	Porcentaje de ocurrencia (%)
C1=B1	1.00E-05	0.138
C2=B2	1.00E-03	13.812
C3= B3	1.00E-03	13.812
C4=B4	1.00E-03	13.812
C5=B5	1.00E-05	0.138
C6=B6	1.00E-03	13.812
C7=B7	1.00E-05	0.138
C8=B8	1.00E-03	13.812
C9=B9	1.00E-05	0.138
C10=B10	1.00E-04	1.381
C11=B11	1.00E-04	1.381
C12=B12	1.00E-03	13.812
C13=B13	1.00E-03	13.812





Tabla 3.12 Eventos básicos con sus probabilidades, de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.

Evento básico	Probabilidad
B1 – Llegada de hidrocarburos de las plantas aportadoras de gas ácido	1.00E-05
B2 – Válvula calzada	1.00E-03
B3 – Falla humana, el operador abre TV-1403	1.00E-03
B4 – Fallas detectadas no corregidas	1.00E-03
B5 – Procedimiento inadecuado	1.00E-05
B6 – Procedimiento no se aplica	1.00E-03
B7– Refaccionamiento inadecuado	1.00E-05
B8– Capacitación menor a lo adecuado	1.00E-03
B9 – Falta de capacitación	1.00E-05
B10 – No se aplica el mantenimiento preventivo/predictivo	1.00E-04
B11 – Mantenimiento preventivo/predictivo deficiente	1.00E-04
B12 – Control de calidad menor a lo adecuado	1.00E-03
B13 – Técnicas de inspección menor a lo adecuado	1.00E-03

3.2.2.6.2 Árbol de Fallas para la "Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R"

Se describen los pasos del desarrollo del árbol de fallas mediante la formación de conjuntos de separación y finalmente llegar a la formación de conjuntos mínimos.

Nivel	Expresión booleana
1	$T = (M1)(B1)(M2)$
2	$T = (B2+M3+M4)(B1)(M5+B3+M6)$
3	$T = (B2+M7+B4+B5+M8+B4)(B1)(B6+B7+M7+B3+B8+M9)$
4	$T = (B2+B9+B10+B4+B5+B5+B11+B4)(B1)$ $(B6+B7+B9+B10+B3+B8+B4+B12)$
5	$T = (B1)(B4+B5+B9+B10)+((B2+B11) (B6+B7+B3+B8+B12))$





Tabla 3.13 Cálculo de conjuntos mínimos y probabilidad de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R

Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia del conjunto	Porcentaje de ocurrencia (%)
C1=B2*B6	1.00E-08	0.02498
C2=B2*B7	1.00E-10	2.498 E-4
C3=B2*B3	1.00E-08	0.02498
C4=B2*B8	1.00E-08	0.02498
C5=B2*B12	1.00E-10	2.498 E-4
C6=B11*B6	1.00E-10	2.498 E-4
C7=B11*B7	1.00E-12	2.498E-6
C8=B11*B3	1.00E-10	2.498 E-4
C9=B11*B8	1.00E-10	2.498 E-4
C10=B11*B12	1.00E-12	2.498E-6
C11=B10	1.00E-05	24.98
C12=B9	1.00E-05	24.98
C13=B5	1.00E-05	24.98
C14=B4	1.00E-05	24.98

Tabla 3.14 Eventos básicos con sus probabilidades del Árbol de Fallas de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R

EVENTO BÁSICO	PROBABILIDAD
B1 = H ₂ S en el proceso	1
B2 = Error humano	1E-03
B3 = Alto contenido de NH ₃ en la carga	1E-05
B4 = Mantenimiento menor a lo adecuado	1E-05
B5 = Refaccionamiento inadecuado	1E-05
B6 = Procedimiento inadecuado	1E-05
B7 = Supervisión durante el trabajo menor a lo adecuado	1E-07
B8 = Existe procedimiento pero no lo usan	1E-05
B9 = Decisiones equivocadas	1E-05
B10 = Coordinación menor a lo adecuado	1E-05
B11 = Refaccionamiento menor a lo adecuado	1E-05
B12 = Falta de capacitación y adiestramiento	1E-07

Los resultados y recomendaciones se muestran en el siguiente capítulo, sección 4.2.





3.2.3 Análisis de consecuencias utilizando el programa PHAST

Actualmente existen muchos modelos utilizados para el análisis de consecuencias. Especialmente son de gran utilidad aquellos programas que proporcionan en forma conjunta los modelos del análisis de consecuencias, las propiedades físico-químicas y la información de toxicidad necesaria para tales evaluaciones.

Ejemplo de estos últimos son el PHAST (Process Hazard Analysis Software Tools) elaborado por DNV Technica y SuperChems de Arthur D. Little Inc. compañía consultora especializada en aspectos de seguridad. Estas herramientas son las más comúnmente utilizadas tanto por agencias gubernamentales como por las compañías petroleras y químicas más grandes en su ramo.

PHAST se derivó a partir del programa de análisis de riesgos SAFETI (Software for the Assessment of Flammable, Explosive and Toxic Impacts). Este programa evalúa las consecuencias de fugas, elaborado por DNV Technica con el apoyo del gobierno holandés a través del Ministerio de Vivienda Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (VROM) y posteriormente en conjunción con los usuarios del programa. Se utilizó la versión 6.0. Este software es aceptado en México por el Instituto Nacional de Ecología (INE) y las compañías aseguradoras, en los Estados Unidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA Environmental Protection Agency) y la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA Occupational Safety and Health Administration), para la determinación de consecuencias en una evaluación de riesgo.

PHAST consta de los modelos de consecuencias y la información de las sustancias peligrosas. Sus principales características son:

- Integración de modelos de descarga y dispersión
- Modelos de evaporación y formación de aerosoles
- Modelos detallados de consecuencias en módulos independientes





- La capacidad de manejar mezclas y cálculos rigurosos de mezclas en equilibrio líquido-vapor
- Diversas medidas de toxicidad
- La posibilidad de emplear alrededor de 1500 sustancias a partir de la base de datos DIPPR (Design Institute for Physical Properties Research)

3.2.3.1 Principales modelos utilizados por PHAST

3.2.3.1.1 Fuente de emisión a partir de un recipiente o tubería

Modela la fuga de material a partir de un recipiente o tubería, considera las condiciones de proceso o almacenamiento. Este modelo incluye los cálculos para obtener el flujo másico y estado del material así también determina las áreas de afectación para la nube tóxica y/o inflamable.

Los cálculos pueden dividirse en cuatro etapas:

a) Descarga

En esta etapa se definen las condiciones de almacenamiento.

b) Fuego o explosión inmediata

Si el material es inflamable; el programa calcula el tamaño e intensidad de los efectos.

c) Dispersión de la nube

A continuación se modela el escenario en el cual la fuga no se enciende, formándose una nube la cual inicia en su punto de emisión, mezclándose con el aire hasta su completa dilución. El peligro causado por la nube depende de su tamaño, localización y perfil de concentraciones. Estas características cambian con el tiempo. Los cálculos se llevan a cabo empleando el modelo de dispersión unificado (UDM Unified Dispersion Model), se obtiene una tabla con los datos relevantes de la nube en diversos intervalos de tiempo posteriores a la fuga.





d) Fuego, explosión y efectos tóxicos tras un lapso de tiempo transcurrido

Una vez que la nube se ha desarrollado pueden ocurrir diversos efectos, estos pueden ser: fuego en charco, explosiones, efectos tóxicos o fuego flash (es un fuego de baja intensidad cuya zona de afectación esta dada por la región inflamable de la nube).

3.2.3.1.2 Fuente de emisión definida por el usuario

Modela la fuga de material considerando las etapas desde la emisión hasta la dispersión de material a concentraciones no dañinas, este modelo realiza cálculos para fuego, explosión y efectos tóxicos para obtener zonas de afectación dadas por valores establecidos para la nube en dispersión.

A diferencia del modelo de fuente de emisión a partir de un recipiente o tubería, este modelo no efectúa los cálculos para la descarga, se debe por consiguiente ingresar el estado del material posterior a la fuga a la presión atmosférica. Para efectuar los cálculos de la descarga se pueden emplear un programa externo como ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) o bien, se pueden utilizar los resultados obtenidos del modelo fuente en recipiente o tuberías, modificando los parámetros necesarios para las condiciones particulares. Empleando este procedimiento se pueden simular los efectos de condiciones de descarga como la fuga por sellos en una bomba o la caída de presión en una tubería con fuga conforme transcurre el tiempo.

3.2.3.1.3 Modelo de dispersión unificado

Relaciona los diferentes factores que ocurren durante la dispersión de los diversos materiales, se emplean las siguientes suposiciones:

- a) Las propiedades al inicio son uniformes.
- b) Si el material se encontraba presurizado este tendrá momentum, el cual producirá un movimiento en la nube en esa dirección.





- c) Por otro lado, si la fuga es instantánea el momentum se distribuirá alrededor del centro de la nube. El momentum irá disminuyendo conforme la nube se mezcle con el aire.
- d) Conforme la nube se mezcla con el aire circundante intervienen varios factores que inducen turbulencia en la mezcla, la densidad relativa, las corrientes oblicuas a la nube, turbulencia del aire debido a las condiciones atmosféricas, la presencia de obstáculos en el trayecto de la nube, etc.

Por lo anterior las condiciones cambian produciendo que las propiedades varíen de acuerdo a la posición dentro de la nube, como son los perfiles de concentración variable.

3.2.3.2 Parámetros

Son valores asociados a las variables usadas en los cálculos, no son parte de la definición de los modelos. Todos los modelos en un análisis usaran habitualmente los mismos parámetros, aunque se pueden variar el valor de éstos para un modelo en particular o si se desea investigar la sensibilidad de los resultados a un parámetro dado.

Para algunos tipos de fugas, más de un efecto será modelado. Por ejemplo para una fuga instantánea bifásica puede producirse un fuego en charco, una ráfaga de fuego o una explosión; el programa realizara los cálculos para los tres efectos.

Tabla 3.15 Relación entre el tipo de fuga y modelos de consecuencias empleadas

Tipo de fuga	Estado posterior a la descarga	Efecto modelado
Instantánea	Todos	BLEVE, bola de fuego
Instantánea	Con vapor	Explosión
Continua	Con vapor y momentum	Dardo de fuego (Jet fire)
Ambos	Con líquido	Fuego en charco





3.2.3.3 Evaluación de efectos de incendio, explosión en una planta de Azufre

Los escenarios aquí descritos se seleccionan de acuerdo a la importancia, capacidad o inflamabilidad de las sustancias que maneje el equipo y conforme al estudio de los incidentes ocurridos dentro la planta, con la finalidad de mostrar los daños que pueden ocasionarse por eventos de esta naturaleza.

Se seleccionaron dos escenarios, los cuales son hipotéticos, para el análisis de consecuencias y son:

1. Fuga de gas ácido en el Reactor Térmico 101-R.
2. Fuga de gas ácido en el Reactor Catalítico 102-R.

A continuación se describen los escenarios de incendio y explosión seleccionados, fundamentos y efectos, así como también los modelos de evaluación de riesgos usados para cada uno de ellos.

3.2.3.4 Descripción de los escenarios de accidente

Tabla 3.16 Descripción de escenarios de incendio y explosión.

ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS					
TIPO DE ESCENARIO	CAUSA Y FUNDAMENTO	EFECTOS			MODELO DE EFECTOS USADO
		RT	OP	P	
1. Fuga de gas ácido en el Reactor térmico 101-R	Debido al material de proceso que circula por el equipo puede llegar a presentar corrosión.		X		1. Modelo de riesgos de incendio y explosión de una nube de gas no confinada.
2. Fuga de gas ácido en el Reactor catalítico 102-R	Debido al material de proceso que circula por el equipo puede llegar a presentar corrosión.	X	X		1. Modelo de riesgos de incendio y explosión de una nube de gas no confinada.

RT: Radiación Térmica
OP: Onda de Presión
P: Projectiles





3.2.3.4.1 Datos requeridos para cada modelo

Tabla 3.17 Datos para el escenario fuga de gas ácido en el reactor térmico 101-R.

Parámetro	Valor
Escenario	Fuga
Material	Gas ácido
Temperatura de operación	627 °C
Presión de operación	0.6 kg/cm ²
Masa de material	1,000 kg
Humedad Relativa	0.78
Temperatura Ambiente	27°C

Tabla 3.18 Datos para el escenario fuga de gas ácido en el reactor catalítico 102-R.

Parámetro	Valor
Escenario	Fuga
Material	Gas ácido
Temperatura de operación	250 °C
Presión de operación	0.5 kg/cm ²
Masa de material	140 kg
Humedad Relativa	0.78
Temperatura Ambiente	27°C

3.2.3.5 Consideraciones para el análisis de consecuencias

A continuación se describen las consideraciones para la simulación y obtención de resultados del análisis de consecuencias:

1. - Para la generación de eventos se utilizaron las siguientes fuentes:
Los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología HazOp.
El registro de incidentes y accidentes de la planta.
2. - Las composiciones de las mezclas generadas para este estudio, fueron tomadas de los balances de materia obtenidos de los diagramas de flujo de proceso (DFP) de la planta.





3. Trabajo en campo.

Adicionalmente, para realizar las simulaciones en el software PHAST se tomaron las siguientes consideraciones:

- a) El orificio formado por corrosión en bridas, sellos de las válvulas y en las líneas analizadas es de forma regular y de un diámetro determinado. El diámetro equivalente del orificio varía desde 3.17 mm (0.125") hasta 12.70 mm (0.5"); para todos los escenarios se considera una fuga en un orificio de 0.50" por corrosión debido a las condiciones.
- b) Las condiciones de presión y temperatura se tomaron de los diagramas de flujo de proceso de cada equipo.
- c) Se contempló un tiempo máximo para la detección y control de la fuga de 10 minutos, tomando en cuenta las siguientes consideraciones: tiempo máximo para la detección del evento por parte del personal de PEMEX y tiempo que ocupa el personal de mantenimiento u operación para llegar al lugar exacto de la fuga y controlarla.
- d) Se consideró una temperatura ambiental media del área de 27°C y una humedad relativa media anual de 78%.
- e) Los radios que se presentan en caso de un evento de antorcha o dardo de fuego, se determinaron a partir de la evaluación de diferentes flujos térmicos, los cuales se indican en la tabla 3.19, y de los diferentes niveles de sobrepresión que se muestran en la tabla 3.20 y en la tabla 3.21 se muestran los daños a las diferentes presiones.

Tabla 3.19 Niveles de radiación

RADIACIÓN	DESCRIPCIÓN
1.4 kW/m ² (440 BTU/h/ft ²)	Es el flujo térmico equivalente al del sol en verano y al medio día. Este límite se considera como zona de seguridad
5.0 kW/m ² 1,268 BTU/h/ft ²)	Nivel de radiación térmica suficiente para causar daños al personal si no se protege adecuadamente en 20 segundos, sufriendo quemaduras hasta de 2º grado sin la protección adecuada. Esta radiación será considerada como límite de zona de amortiguamiento
12.5 kW/m ² (3,963 BTU/h/ft ²)	Es la energía mínima requerida para la ignición pilotada de la madera y fundición de tubería de plástico. Con 1% de letalidad en 1 minuto. Esta radiación se considerará para el personal y las instalaciones como zona de alto riesgo





Tabla 3.20 Niveles de sobrepresión

PRESIÓN	DESCRIPCIÓN
0.3 psi (0.02 bar)	La sobrepresión a la que se presentan rupturas del 10% de ventanas de vidrio y algunos daños a techos; este nivel tiene la probabilidad del 95% de que no ocurran daños serios. Esta área se considerará como limite de la zona de salvaguarda
1 psi (0.13 bar)	Es la presión en la que se presenta destrucción parcial de casas y daños reparables a edificios; provoca el 1% de ruptura de tímpanos y el 1% de heridas serias por proyectiles. De 0,5 a 1 lb/pulg ² se considerará como la zona de amortiguamiento
2 psi (0.20 bar)	A esta presión se presenta el colapso parcial de techos y paredes de casas. De 1 a 2 lb/pulg ² se considera como la zona de exclusión (riesgo)

Tabla 3.21 Daños en plantas y refinerías

PRESIÓN (psig)	EVALUACIÓN DE DAÑOS POR EXPLOSIONES	
	REFINERÍAS	PLANTAS
0.5	- Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): rotura de ventanas.	- Cuarto de control (techo metálico): rotura de ventanas y medidores. - Cuarto de control (techo de concreto): rotura de ventanas y medidores. - Torre de enfriamiento: falla de mamparas
1.0	- Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): deformación de la estructura.	- Cuarto control (techo metálico): conectores dañados por colapso del techo. - Cuarto de control (techo de concreto): dañados por colapso del techo. - Tanques de almacenamiento (techo cónico): colapso del techo.
2.0		- Calentador: fractura de ladrillos. - Reactor químico: rotura de ventanas y medidores. - Filtros: falla de paredes de concreto.
3.0	- Edificio de mantenimiento: deformación.	Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (llenado al 50%). - Cubículo de instrumentos: líneas de fuerza dañadas, controles dañados.
5.0	- 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. - Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad.	- Calentador: unidad destruida. - Regenerador: marcos colapsados. - Motor eléctrico: daño por proyección de partículas. - Ventilador: carcaza y caja dañadas.



**Tabla de daños en plantas y refinerías (continuación)**

PRESIÓN (psig)	EVALUACIÓN DE DAÑOS POR EXPLOSIONES	
	REFINERIAS	PLANTAS
0.5	<ul style="list-style-type: none">- Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): rotura de ventanas.	<ul style="list-style-type: none">- Cuarto de control (techo metálico): rotura de ventanas y medidores.- Cuarto de control (techo de concreto): rotura de ventanas y medidores.- Torre de enfriamiento: falla 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 control (techo metálico): conectores dañados por colapso del techo.- Cuarto de control (techo de concreto): dañados por colapso del techo.- Tanques de almacenamiento (techo cónico): colapso del techo.
2.0		<ul style="list-style-type: none">- Calentador: fractura de ladrillos.- Reactor químico: rotura de ventanas y medidores.- Filtros: falla de paredes de concreto.
3.0	<ul style="list-style-type: none">- Edificio de mantenimiento: deformación.	<ul style="list-style-type: none">- Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (llenado al 50%).- Cubículo de instrumentos: líneas de fuerza dañadas, controles dañados.
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.- Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o 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.
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, (estructura de acero) caía de la torre.- Tanques 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.





Tabla de daños en plantas y refinerías (continuación)

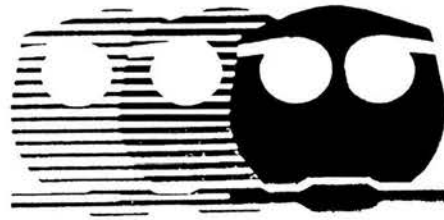
PRESIÓN (psig)	EVALUACIÓN DE DAÑOS POR EXPLOSIONES	
	REFINERIAS	PLANTAS
10.0	- Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro): derrumbe de estructura de fierro.	<ul style="list-style-type: none">- Cuarto de control (techo de concreto): unidad destruida.- Transformados eléctrico: 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">- Tanque de almacenamiento (techo flotante): colapso del techo.
30.0		<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.

Los resultados se pueden observar en el capítulo 4, sección 4.3.



*Ahora que corre sangre puma por mis venas,
siento que los gritos del goya retumban más
fuertes que nunca, para recordar que siempre
estarán presente en mi mente los lineamientos
y preceptos de un universitario, servir a mis
semejantes y a mi país, pero sobre todo, nunca
olvidar de donde vengo, de mi querida Universidad.*

CAPÍTULO 4



Recomendaciones y Conclusiones



4. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Lo que se busca llevando a cabo un análisis de riesgos, entre otras cosas, es obtener una serie de recomendaciones y acciones a seguir para mejorar o continuar con la seguridad de la planta.

4.1 Recomendaciones del análisis HazOp

Las recomendaciones del análisis HazOp para la planta recuperadora de azufre de acuerdo con los nodos seleccionados son las siguientes:

Tabla 4.1 Tabla de recomendaciones para el análisis HazOp

CLASE	NODO	ESCENARIO	RECOMENDACIONES
C	1. Tanque separador de gas ácido, 101-V	1	<ol style="list-style-type: none">1. Instalar un analizador de gas de cola en la línea de salida del coalescedor 102-V.2. Mantener comunicación con los sectores que suministran el gas ácido para no enviar hidrocarburos a la planta de azufre y mantener el gas ácido dentro de especificación.
C		4	<ol style="list-style-type: none">1. Contar con stock de refaccionamiento para las bombas y motores eléctricos 101-P y 101-PA.
D		2	<ol style="list-style-type: none">1. Contar con las tres plantas de azufre disponibles para no ventear gas ácido a la atmósfera.
D		3	<ol style="list-style-type: none">1. Las plantas aportadoras de gas ácido cumplan con la especificación del contenido de hidrocarburo (5% Hcs).2. Comunicación de las plantas cuando se tenga un descontrol operacional en su sección de tratamiento de gas a la planta de azufre.
D		5	<ol style="list-style-type: none">1. Contar con stock de refaccionamiento para los instrumentos de control.2. Continuar con el programa de revisión y calibración al circuito de protecciones.





4. Recomendaciones y Conclusiones.

Tabla de recomendaciones para el análisis HazOp, continuación

CLASE	NODO	ESCENARIO	RECOMENDACIONES
D		6	<ol style="list-style-type: none">1. Mantener siempre disponibles las bombas 101 P/PA.2. Continuar con la capacitación del personal operativo para la toma de decisiones.
C	2. Reactor térmico 101-R	7	<ol style="list-style-type: none">1. Efectuar la administración al cambio para la instalación de indicadores de temperatura tipo infrarrojo en el reactor térmico 101-R.
C		8	<ol style="list-style-type: none">1. Continuar con los mantenimientos preventivos y revisión al circuito de protecciones.2. Continuar con el programa de capacitación al personal operativo sobre plan de contingencia.
C		9	<ol style="list-style-type: none">1. En cada reparación programar la revisión y/o cambio de la válvula check.
C	7. Convertidor catalítico, 102-R.	24	<ol style="list-style-type: none">1. Evitar paros continuos para evitar la formación de carbón.2. Continuar con la capacitación al personal operativo.3. Regeneración de las camas del catalizador.
C		25	<ol style="list-style-type: none">1. Evitar paros continuos para evitar la formación de carbón.2. Continuar con la capacitación al personal operativo.
C		26	<ol style="list-style-type: none">1. Mantener un control estricto de la temperatura en el TI-1104 a la salida de la caldereta 101-EX.2. Continuar con el mantenimiento preventivo al circuito de instrumentos.
C		27	<ol style="list-style-type: none">1. Parar el soplador, 101-K/KA/KB, cuando se tenga alto flujo de aire y alto contenido de hidrocarburos en el gas ácido.2. Cerrar todas las posibles entradas de aire al reactor, recalentadores y coalescedor.
C		28	<ol style="list-style-type: none">1. Continuar con los mantenimientos preventivos y revisión al circuito de protecciones.2. Continuar con el programa de capacitación al personal operativo sobre plan de contingencia.





4.2 Resultados y recomendaciones del análisis de árbol de fallas

Los resultados y recomendaciones para el árbol de fallas de los “daños a la chimenea 102-L por alta temperatura”, se muestran en la tabla 4.2. Se obtuvo una probabilidad 7.24×10^{-3} y una frecuencia de 7.26×10^{-3} al año. Si se expresa la probabilidad de este evento en por ciento, se tiene que 0.724 % de probabilidad de ocurrencia de los daños a la chimenea 102-L.

Tabla 4.2 Recomendaciones para el escenario de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.

ESCENARIO	PROBABILIDAD	RECOMENDACIÓN
1. Daños a la chimenea 102-L por alta temperatura.	7.24×10^{-3}	1. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo al circuito de instrumentos. 2. Continuar con la aplicación del procedimiento de instalación del concreto refractario en la chimenea.
	FRECUENCIA	
	7.266×10^{-3} fallas por año.	

Para el árbol de fallas de la “perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R”, los resultados y recomendaciones se muestran en la tabla 4.3. Se calculó una probabilidad de 4.003×10^{-5} y una frecuencia de 4.00308×10^{-5} al año. Al expresar la probabilidad de este evento en por ciento, se tiene que 4.003×10^{-3} % de probabilidad de ocurrencia de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.

En la tabla 3.11 y 3.13, se muestran los cálculos de las probabilidades para cada conjunto mínimo, en las mismas se tienen una columna de porcentaje de ocurrencia, se refiere a la contribución en por ciento de cada conjunto mínimo, en el desarrollo de los eventos culminantes de los daños a la chimenea 102-L por alta temperatura y la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R respectivamente.





Tabla 4.3 Recomendaciones para el escenario de la perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.

ESCENARIO	PROBABILIDAD	RECOMENDACIÓN
2. Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R.	4.003X10 ⁻⁵	1. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo al circuito de instrumentos.
	FRECUENCIA 4.00308X10 ⁻⁵ fallas por año.	2. Mantener un adecuado control de la temperatura a la salida de la caldereta 101-EX. 3. Continuar con el programa de capacitación al personal operativo. 4. Continuar con la aplicación del procedimiento de instalación del concreto refractario en el reactor.

4.3 Resultados del Análisis de Consecuencias

4.3.1 Escenario No. 1: Fuga y explosión de gas ácido en el Reactor térmico 101-R

En esta sección se muestran los resultados del escenario de fuga de mezcla explosiva en el reactor térmico 101-R. La duración de la descarga puede ser cambiada según la respuesta para mitigar la fuga, para este caso se considero que la respuesta será de 10 minutos, ya que durante este tiempo se espera que se controle la fuga, se estima un flujo de la fuga de 0.02 kg/s, por lo tanto en 10 minutos se fugan 12 kg de gas ácido.

En la tabla 4.4 se muestran los niveles de sobrepresión alcanzados por la explosión de H₂S, en ésta se puede observar que el grado de afectación dependerá de la distancia a la que se encuentran los equipos y/o las personas del centro de la explosión de la nube y en la tabla 4.5 muestra los efectos de los distintos niveles de sobrepresión de la explosión. En el diagrama AC-25 (Anexo E), se puede observar las distancias de afectación a diferente sobrepresión.





4. Recomendaciones y Conclusiones.

Bajo las condiciones de operación del equipo y debido a la fuga se produce la típica descarga de chorro (jet), si la descarga entra en ignición se produce el dardo de fuego (Jet fire). En la tabla 4.6, se muestra un resumen de los resultados por dardo de fuego estos resultados corresponden a una clase de estabilidad atmosférica "F", esto se refiere a un día estable, soleado con nubes moderadas y viento moderado de 10 m/s.

Tabla 4.4 Resultados de la explosión en escenario No. 1.

Nivel de sobrepresión	Distancia (m)	Efectos esperados
0.02 bar (0.30 psi)	119	Limite de proyectiles. 95 % de probabilidad de no sufrir daños importantes Daños menores a techos de casas. Rotura del 10% de los cristales.
0.14 bar (2.0 psi)	30.85	Colapso parcial de paredes y techo de casas. Calentador: fractura de ladrillos. Reactor químico: ruptura de ventanas y medidores. Filtros: falla de paredes de concreto.
0.21 bar (3 psi)	23.87	Dstrucción de paredes de cemento de 20 a 30 cm de grosor. Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (50% llenado). Cubiculo 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%).

Tabla 4.5 Niveles de sobrepresión a diferentes distancias, por la explosión del escenario No. 1.

Distancia (m)	Sobrepresión (bar)
50.00	0.07
100.00	0.03
150.00	0.02
200.00	0.01
250.00	0.01
300.00	0.01



**Tabla 4.6 Riesgo por dardo de fuego (Jet fire).**

Longitud de la flama	2.29 m
Emisividad de la flama	1.40 kW/m ²
Velocidad del dardo de fuego	352 m/s.
Exposición máxima	20 s.

4.3.2 Escenario No. 2: Fuga y explosión de gas ácido en el reactor catalítico 102-R

A continuación se muestran los resultados del escenario de fuga de mezcla explosiva en el reactor 102-R, intencionalmente se asume que la fuga tiene una duración de 10 minutos. En la tabla 4.7 se encuentran los resultados de la fuga. En el diagrama AC-26 (Anexo E), se puede observar las distancias de afectación a diferente sobrepresión.

Tabla 4.7 Velocidad de descarga de mezcla explosiva.

Flujo de descarga	0.02 kg/seg
Duración de descarga	600 seg
Cantidad descargada (inventario)	140 kg
Velocidad en el orificio	227 m/s
Estado del material	Gas

En condiciones de operación del equipo y debido a la fuga se produce la típica descarga de chorro (jet), si la descarga entra en ignición se produce el dardo de fuego (Jet fire). En la tabla 4.8, se muestra un resumen de los resultados por dardo de fuego, los resultados mostrados en esta tabla, corresponden a una clase de estabilidad atmosférica "F", esto es, un día estable, soleado con nubes moderadas y viento moderado de 10 m/s.

Tabla 4.8 Riesgo por dardo de fuego (Jet fire).

Longitud de la flama	2.05 m
Emisividad de la flama	1.4 kW/m ²
Velocidad del dardo de fuego	352 m/s.
Exposición máxima	20 s.



**Tabla 4.9 Resultados de la explosión en escenario No. 2.**

Nivel de sobrepresión	Distancia (m)	Efectos esperados
0.02 bar (0.30 psi)	128	Limite de proyectiles. 95 % de probabilidad de no sufrir daños importantes Daños menores a techos de casas. Rotura del 10% de los cristales.
0.14 bar (2.0 psi)	33	Colapso parcial de paredes y techo de casas. Calentador: fractura de ladrillos. Reactor químico: ruptura de ventanas y medidores. Filtros: falla de paredes de concreto.
0.21 bar (3 psi)	25	Destrucción de paredes de cemento de 20 a 30 cm de grosor. 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%).

Para mostrar los efectos de los distintos niveles de sobrepresión de la explosión se presenta la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Niveles de sobrepresión a diferentes distancias, por la explosión del escenario No. 2.

Distancia (m)	Sobrepresión (bar)
50.00	0.07
100.00	0.03
150.00	0.02
200.00	0.01
250.00	0.01
300.00	0.01
350.00	0.01
400.00	0.01
450.00	0.01
500.00	0.00





4.4 Conclusiones

La **Evaluación de Riesgos** es de vital importancia **para el control y reducción de riesgos**, ya que esta evaluación es el proceso de estimar la probabilidad de que ocurra y la magnitud probable de los efectos adversos de un acontecimiento, es decir, esta evaluación se centra en la identificación de peligros y análisis de consecuencias. A partir de los resultados de la evaluación de riesgos se puede hacer una planeación para la prevención y control de los riesgos.

Una vez hecha la Evaluación de Riesgos y con los resultados obtenidos se puede concluir para cada uno de los métodos utilizados. En el caso del Análisis HazOp, para los 3 nodos seleccionados, las recomendaciones se clasificaron en 14, de las cuales 10 fueron de tipo C y 4 del D, lo cual significa que no existe ninguna recomendación de alta o media prioridad, pero si probabilidades de riesgo bajas de consecuencias no graves. Para estas clasificaciones (C, D) se recomienda seguir utilizando los controles adecuados para mantener estos niveles con bajo riesgo de probabilidad.

Del resultado de Análisis HazOp obtenemos una lista de recomendaciones, con la cual se hace un plan de trabajo que servirá al personal de la planta para poner fechas de compromisos y así llevar a cabo las modificaciones necesarias, en el caso de que en el análisis se hayan identificado fallas. Al revisar la lista, podemos observar que una de las recomendaciones más mencionadas es la que se refiere a la "capacitación al personal". Es de gran importancia esta capacitación la cual debe darse al personal responsable de operación y de mantenimiento de la planta, esta tendrá que ser inicial y periódica. En el entrenamiento inicial se deben desarrollar criterios de aptitudes para asegurar que las personas asignadas para operar no solo cuenten con conocimientos, sino también con habilidades para llevar a cabo sus tareas y responsabilidades. El entrenamiento periódico deberá proporcionar la actualización para asegurar que el personal se apegue a los procedimientos vigentes.





Otras de las recomendaciones más utilizadas fueron: "Dar mantenimiento preventivo", "Continuar con el mantenimiento preventivo de revisión y calibración a circuitos de protección" y "Contar con refaccionamiento adecuado". Es necesario contar con sistemas de mantenimiento donde incluyan, procedimientos de mantenimiento y prácticas de trabajo para asegurar la integridad mecánica del equipo, además de un control de calidad para asegurar que se cumple con las especificaciones de diseño.

En el Análisis de Árbol de Fallas los eventos se seleccionaron arbitrariamente, en uno de ellos, el de la "Perforación e incendio del metal base del reactor catalítico" se tuvieron cuatro conjuntos mínimos que contribuyeron considerablemente a que el evento se llevara a cabo, cada uno con el 24.98%. Los conjuntos mínimos son: "Mantenimiento menor a lo adecuado", "Refaccionamiento inadecuado", "Decisiones equivocadas" y "Coordinación menor a lo adecuado".

De los dos eventos culminantes seleccionados para realizar el Análisis de Árbol de Fallas, tenemos que para el evento de los "daños a la chimenea 102-L por alta temperatura" la probabilidad es de 7.24×10^{-3} y la frecuencia de que ocurra en un año es de 7.26×10^{-3} , y para el evento de la "perforación e incendio del metal base del reactor catalítico 102-R" la probabilidad es de 4.003×10^{-5} y la frecuencia de 4.00308×10^{-5} por año. Aunque estas probabilidades son relativamente bajas se debe considerar, en el primer caso, que este evento podría ser probable.

El Análisis de Consecuencias ayuda a determinar la importancia de los eventos identificados no deseados, para así poder hacer una toma de decisiones sobre la inversión de recursos de forma más eficiente para la reducción de riesgos.

De acuerdo a la tabla 4.4 donde se dan los resultados del escenario de "Fuga explosión de gas ácido en el reactor térmico 101-R", el radio máximo de destrucción total será de 23.87 m, el radio de daños parciales será de 30.85 m aproximadamente y el radio de afectación máximo será de 119 m aproximadamente; después del radio de afectación máximo se considera zona





4. Recomendaciones y Conclusiones.

segura, ya que el límite de proyectiles será de 119 m. Y para el escenario de "Fuga y explosión de gas ácido en el reactor catalítico 102-R", según la tabla 4.9, el radio máximo de destrucción total será de 25 m, el radio de daños parciales será de 33 m aproximadamente y el radio de afectación máximo será de 128 m aproximadamente; después del radio de afectación máximo se considera zona segura, ya que el límite de proyectiles será de 128 m.

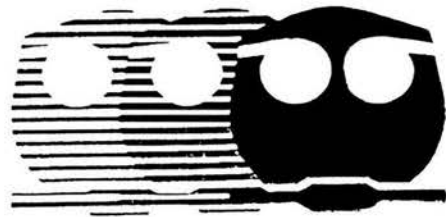
Con respecto a protección ambiental, al hacer una revisión al estudio HazOp (Anexo C), en las causas de las diferentes desviaciones, tenemos como consecuencias la contaminación ambiental, éste es un claro ejemplo de la importancia de implementar estos análisis de riesgos ya que al identificar los posibles escenarios se podrá tener una serie de recomendaciones para evitarlos. La planta recuperadora de azufre cumple con su primordial objetivo, el de reducir la contaminación ambiental, evitando enviar grandes cantidades de emisiones a la atmósfera y, como ya se vio, cumple con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. En el área de protección ambiental, todavía estamos empezando, afortunadamente ya existe conciencia por parte de la sociedad en general lo cual refleja el interés que se ha tomado en torno a nuestro ambiente y de lo vital que resulta cuidarlo.



*Dueños de la noche, porque en ella soñamos,
dueños de la vida, porque sabemos que no hay
sino un largo camino que se cumple en prepararla
y gastarla para el fin.*

Carlos Fuentes

ANEXO A



Especificaciones, Requisitos y
Métodos de Prueba



Especificaciones

1. Las plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos existentes, nuevas y modificadas deben controlar sus emisiones de compuestos de azufre a la atmósfera y medirlas en forma continua.
2. La eficiencia mínima de control de emisiones a la atmósfera de compuestos de azufre de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos en condiciones normales de operación es la que se establece en la tabla 1, a excepción de lo indicado en el 5.3 de esta Norma.

Dicha eficiencia se expresa en por ciento de recuperación de azufre y es función de la capacidad nominal del sistema de control de emisiones (X) y de la concentración promedio de H₂S en el gas ácido de entrada al sistema o a las plantas recuperadoras (Y), la cual se determina según el método establecido en el numeral 7.2 de esta Norma.

TABLA 1.- EFICIENCIA MINIMA DE CONTROL DE EMISIONES
(O DE RECUPERACION DE AZUFRE)

Concentración (% de H ₂ S en el gas ácido), Y	Capacidad Nominal del Sistema o de la Planta Recuperadora de azufre (toneladas de azufre recuperado por día), X		
	2 a 5 ton/día	5 a 300 ton/día	>300 ton/día
> 20	E _m = 74%	$E_m = 85.35 X^{0.0144} Y^{0.0128}$	E _m = 97.5%
10-20	E _m = 74%	E _m = 90.8%	E _m = 90.8%
< 10	E _m = 74%	E _m = 74%	E _m = 74%

3. Cualquier planta desulfuradora de gas y condensados amargos nueva que se instale en una zona crítica deberá contar con un sistema de control de emisiones (o de recuperación de azufre) cuya eficiencia mínima sea mayor o igual al 98%, cualquiera que sea su capacidad.





Requisitos

1. El diseño de los sistemas de control de emisiones de las plantas desulfuradoras de gas ácido y condensados amargos deberá ser tal, que la concentración de ácido sulfhídrico en los gases de salida de la chimenea sea menor o igual a 10 ppm, en volumen.

2. Los responsables de la operación de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos deben llevar una bitácora de operación y mantenimiento, de cada una de estas plantas, la cual debe permanecer en el centro de trabajo por un periodo mínimo de cinco años y puede ser almacenada y desplegada en forma electrónica y como parte de los controles computarizados con que cuente cada planta. En la bitácora debe registrarse como mínimo la siguiente información:

2.1 Control de operación: Fecha, consumo diario de combustible en el oxidador térmico, promedio diario de la temperatura de operación del oxidador térmico, determinación cada 24 horas del volumen en base húmeda de gas ácido alimentado (millones de pies cúbicos por día MMPCD) a condiciones de 1.0 kgf/cm² y 20°C, resultados de la concentración diaria en % mol de H₂S base seca, concentración diaria de compuestos de azufre en el gas de cola, y memoria de cálculo de eficiencia y promedios trimestrales.

2.2 Control de emisiones contaminantes: Promedio diario de los siguientes parámetros: concentración de bióxido de azufre y flujo volumétrico de los gases de salida del oxidador térmico, emisión másica en toneladas por día de bióxido de azufre (E (SO₂)) y memoria de cálculo de promedios trimestrales.

2.3 Control de Mantenimiento: Intervenciones a los equipos críticos: soplador, reactor térmico, condensadores, oxidador térmico y sistemas de control, cambios de catalizador.





3. Para cumplir con el requisito establecido en el numeral 6.2.2 de esta Norma, los responsables deben instalar y mantener en buenas condiciones de operación, equipos de monitoreo continuo de las emisiones de bióxido de azufre.

3.1 Estos equipos deben operar cuando menos el 90% del tiempo de operación del sistema de control de emisiones utilizado y deben contar con un sistema de procesamiento de datos automático que registre un mínimo de 12 lecturas por hora, calcule el promedio diario de los parámetros indicados y genere un reporte impreso diario con la fecha y la identificación del equipo, que se anexará a la bitácora.

3.2. El método de medición de la concentración de bióxido de azufre en la emisión a la atmósfera por la chimenea del oxidador térmico debe ser el de espectroscopia de absorción en el ultravioleta no dispersivo o un método equivalente y el del flujo volumétrico de gases debe ser el de presión diferencial en un tubo Pitot, sugiriendo llevar a cabo el procedimiento establecido en la NMX-AA-009-SCFI-1993 y siguiendo los procedimientos y cálculos especificados por el fabricante.

3.3 Los responsables de la operación de estas plantas deberán instalar y mantener en buenas condiciones Plataformas y Puertos de Muestreo de acuerdo a lo señalado en la Norma Mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993, en cada una de las chimeneas de los oxidadores térmicos para la colocación permanente del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de SO₂.

Para verificar el funcionamiento del equipo en la chimenea de cada oxidador térmico, deben instalarse por lo menos 2 puertos de muestreo adicionales, colocados 30 centímetros debajo de los requeridos en la NMX-AA-009-SCFI-1993 y formando un ángulo de 45°, a los cuales se tendrá acceso desde la plataforma de muestreo.





Métodos de prueba

1. La eficiencia del sistema de control de emisiones de bióxido de azufre (E) o la eficiencia de cada planta recuperadora se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E = 100\% (S_T - S_{GC}) / S_T$$

En donde:

E es la eficiencia del control de emisiones de bióxido de azufre (E); para el caso de utilizar un sistema de recuperación de azufre, ésta es equivalente a la eficiencia de cada planta recuperadora;

S_T es la carga de azufre total en el gas ácido que se alimenta al sistema de control de emisiones o, en su caso a cada planta recuperadora; se determina según la metodología del 7.2, en toneladas por día;

S_{GC} es la cantidad de azufre en el gas de cola, en forma de H_2S , SO_2 , COS , CS_2 y vapores de azufre; se determina de acuerdo a lo establecido en el 7.3 y se expresa en toneladas por día.

2. Determinación de la carga de azufre S_T : La carga total de azufre en el gas ácido S_T que se alimenta al sistema de control de emisiones o, en su caso, a cada planta recuperadora en toneladas por día se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_T (\text{ton/día}) = \frac{36.51 \cdot (F_{ga}) \cdot (\% \text{molH}_2\text{Sbh})}{100}$$

En donde:

F_{ga} es el flujo de alimentación de gas ácido en base húmeda (F_{ga}) en millones de pies cúbicos (MMPCD) por día. Se determina con un medidor de gas ácido de carga colocado en la línea principal de alimentación a cada uno de los sistemas de control de emisiones (plantas recuperadoras de azufre) la medición deberá ser compensada por presión, temperatura y por el peso molecular a condiciones de 1.0 kgf/cm^2 y 20°C . Como elemento primario de





medición se puede utilizar un tubo Vénturi, placas de orificio o un sistema equivalente.

% mol de H_2S bh es la concentración promedio de 24 horas de ácido sulfhídrico (% H_2S) en el gas ácido a la entrada del sistema de control de emisiones; se determina mediante análisis de cromatografía de gases con columna empacada y detector de conductividad térmica en base seca, efectuando las correcciones por el contenido de agua.

3. Determinación de la cantidad de azufre en el gas de cola S_{GC} : La cantidad de azufre en el gas de cola se obtiene como resultado de la suma de la cantidad de azufre en forma de compuestos de azufre, S_c , y la cantidad de azufre contenido en forma de vapores, S_v :

$$S_{GC}(\text{ton/día}) = S_c(\text{ton/día}) + S_v(\text{ton/día})$$

3.1 Determinación de S_c : La cantidad de azufre en toneladas por día contenida en el gas de cola en forma de H_2S , SO_2 , COS , CS_2 , se determina por la ecuación:

$$S_c(\text{ton/día}) = 0.032064 \cdot \left(\frac{N_{\text{aire}}(\text{Kg-mol/día})}{\% \text{mol} N_2} \right) \cdot (\% \text{mol} H_2S + \% \text{mol} SO_2 + \% \text{mol} COS + 2(\% \text{mol} CS_2))$$

En donde:

%mol H_2S , SO_2 , COS , CS_2 , N_2 es la composición del gas de cola; se determina mediante análisis cromatográfico en base seca y se calcula su composición en base húmeda;

N_2 aire(Kg-mol/día) es el flujo molar de nitrógeno que entra a la planta recuperadora; es igual al flujo molar de nitrógeno en el gas de cola, se determina conforme a la ecuación siguiente:

$$N_{2 \text{ aire}} (\text{Kg mol/día}) = \text{Faire (MMPCD)} \cdot \% \text{mol} N_2 (\text{bh})_{\text{aire}} \cdot 11.3877$$

En donde:





% mol N_2 (bh) _{aire} es el contenido de nitrógeno del aire en base húmeda;
F aire (MMPCD) es el flujo total de aire en millones de pies cúbicos por día (MMPCD) que entra a la planta recuperadora.

3.2 Determinación de S_v : la cantidad de vapor de azufre en el gas de cola se determina con las ecuaciones siguientes:

$$S_v(\text{ton/día}) = \% \text{mol} S_v \cdot 7.65 \left(\frac{N_{2\text{aire}}(\text{Kgmol/día})}{\% \text{mol} N_2(\text{bh})} \right) \cdot 0.032064$$

$$\% \text{mol} S_v = \text{antilog} \left(6.0849 - \frac{4087.8}{T + 273} \right) \cdot \frac{100}{P_{\text{abs}}}$$

En donde:

T es la temperatura de salida del gas de cola en °C;

P abs es la presión de vapor del azufre; en Kg/cm²

%mol N_2 (bh) es el contenido de nitrógeno en % mol del gas de cola determinada mediante análisis cromatográfico en base seca y efectuando las correcciones para su determinación en base húmeda.

Esta fórmula es válida para temperaturas del vapor de azufre comprendidas entre 100 y 200°C.

4 La eficiencia E así calculada diariamente se compara con la eficiencia mínima requerida señalada en la tabla 1, E_m . Los promedios trimestrales de ambos valores (E^T , E_m) deben cumplir la siguiente ecuación:

$$E^T \geq E_m$$

Para la obtención de los promedios trimestrales anteriores, no se consideran los valores de las lecturas obtenidas durante las siguientes condiciones:

- a. Operaciones de paro, liberación y enfriamiento de la planta recuperadora para mantenimiento preventivo y correctivo, siempre que no excedan de 96 horas.





- b.** Operaciones de estabilización durante el arranque de la planta, siempre que no excedan de 48 horas.
- c.** Contingencias que impliquen la salida de operación del sistema de reducción de emisiones o partes del mismo, siempre que no excedan de 24 horas.

5 Con fines de comprobación, se compara el valor de la emisión másica de bióxido de azufre medido en la chimenea del oxidador térmico de cada planta recuperadora de azufre mediante el equipo de monitoreo continuo de emisiones ($E(SO_2)$, ton/día), con el valor obtenido de S_{GC} , la cantidad de azufre en el gas de cola y se debe cumplir la relación siguiente:

$$E(SO_2) = (2 \pm 0.4) S_{GC}$$

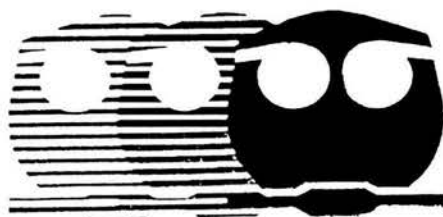
6 Los responsables deben informar en la tabla 2.3.1 de la Cédula de Operación Anual lo siguiente:

6.1 La emisión total anual de bióxido de azufre.

6.2 La eficiencia promedio anual del sistema de control de cada instalación utilizando los promedios trimestrales. Asimismo, deben anexar a la Cédula de Operación Anual copia de la memoria de cálculo de dichos promedios.



ANEXO B

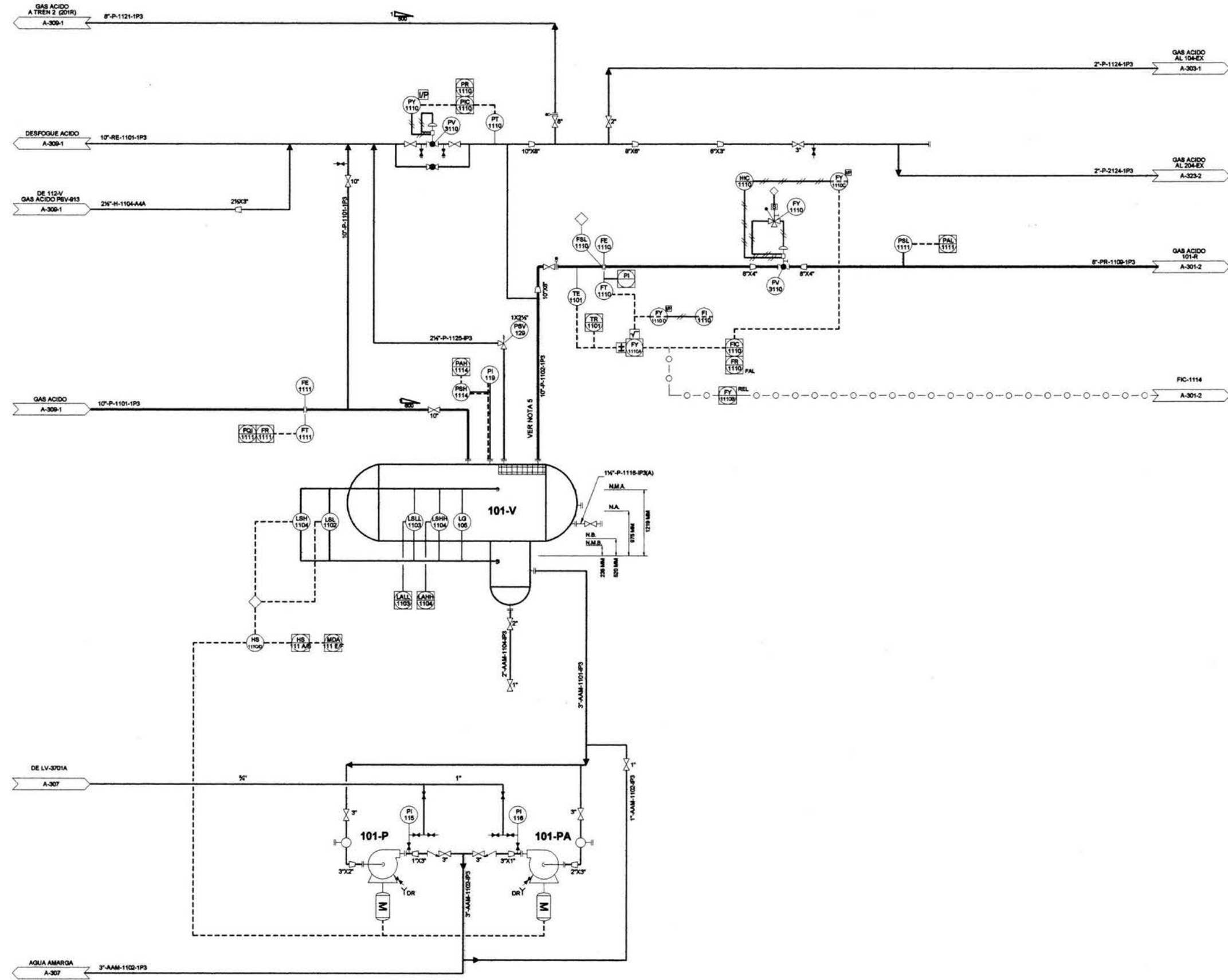


Diagramas de Tubería e
Instrumentación

1-100-V

101-V
REPARADOR DE GAS ACIDO
1.219 mm DIAMETRO X 1.830 mm (T-7)
PRESION DISEÑO: 3.11 kg/cm²
TEMPERATURA DISEÑO: 71°C
MATERIAL: A-307
INTERNOS: MALLA AL #16

101-P/PA
BOMBA DE AGUA AMARGA
CAPACIDAD: 27 m³/HR
CABEZA DIFERENCIAL: 5.57 kg/cm²
MATERIAL CARCAZA: A-318-WCB
MATERIAL INTERIORS: A-318-WCB
POTENCIA: 7.5 HP
TAG. ELEM. MOTRIZ: 01-PWPAM

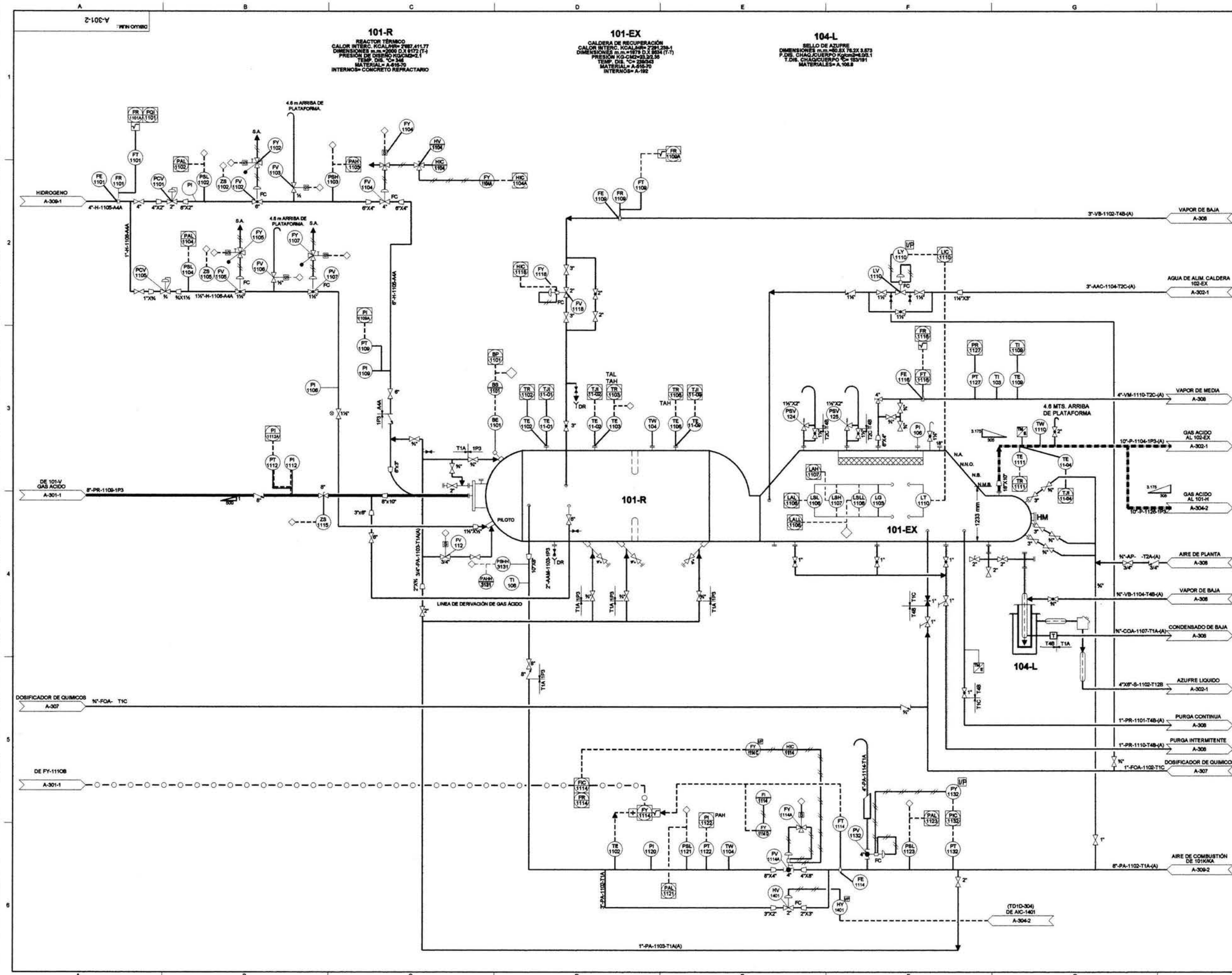


CIRCUITO DE CARGA

PROVEEDOR: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)
Conjunto E, Lab. 212

TÍTULO DEL DIBUJO: PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE II.
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
REACTOR TERMICO (TREN 1)

NÚMERO DE DIBUJO: A-301-1 FECHA DE REVISIÓN: NOVIEMBRE-2002



101-R
 REACTOR TÉRMICO
 CALOR INTERC. KCAL/Hr= 2887.41177
 DIMENSIONES m.m. = 2000 D X 8172 (T-1)
 PRESION DE DISEÑO KOC/CM²= 1
 TEMP. DIS. °C= 348
 MATERIAL= A-465-70
 INTERNOS= CONCRETO REFRACTARIO

101-EX
 CALDERA DE RECUPERACIÓN
 CALOR INTERC. KCAL/Hr= 2281.288-1
 DIMENSIONES m.m. = 1875 D X 2834 (T-1)
 PRESION DE DISEÑO KOC/CM²= 1.5
 TEMP. DIS. °C= 288.543
 MATERIAL= A-465-70
 INTERNOS= A-182

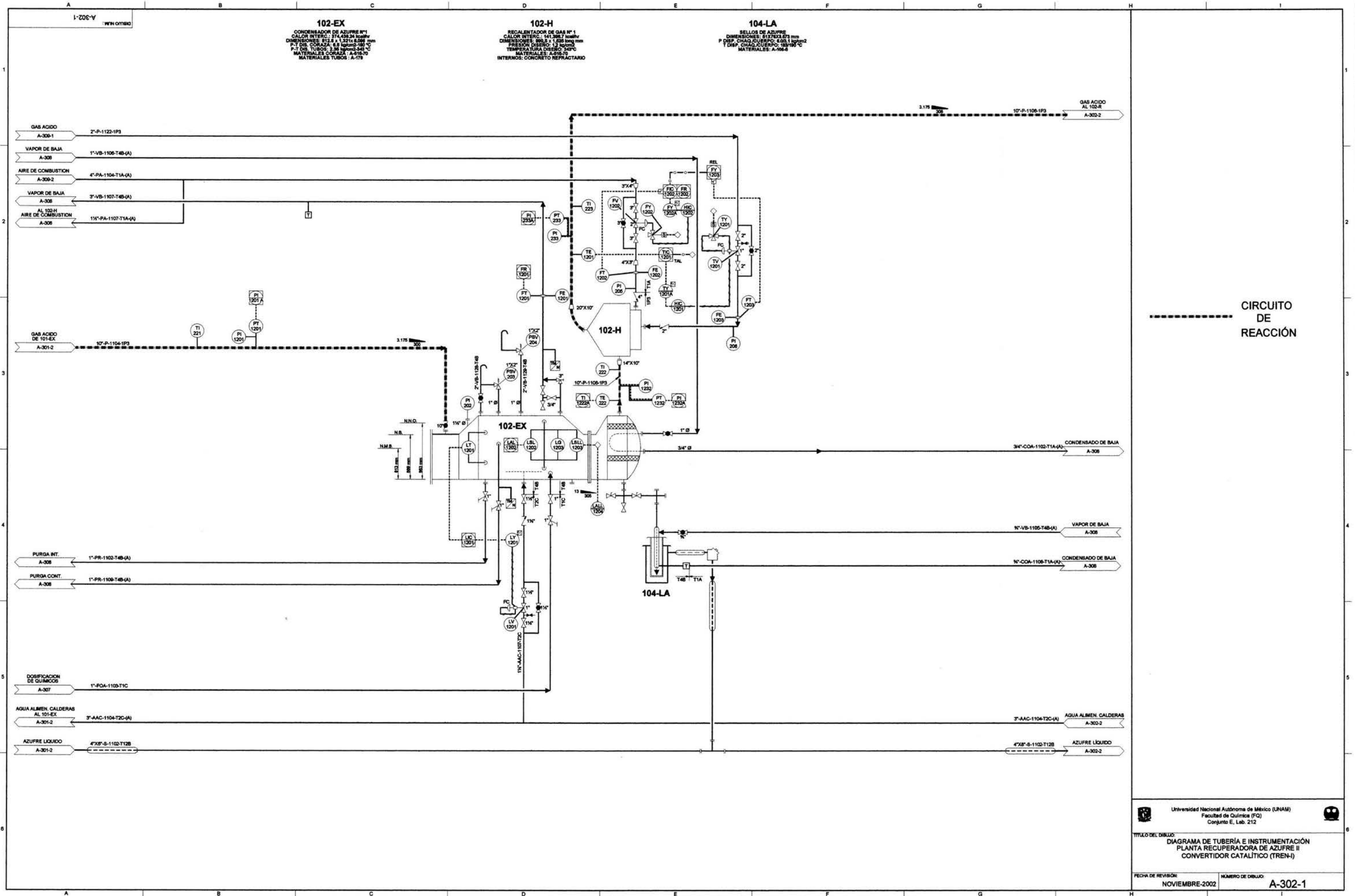
104-L
 SELLO DE AZUFRE
 DIMENSIONES m.m. = 482.24 T X 24.873
 P.DIS. CHACOCUERPO KOC/CM²= 4.02.1
 T.DIS. CHACOCUERPO °C= 183.191
 MATERIALES= A-106.2

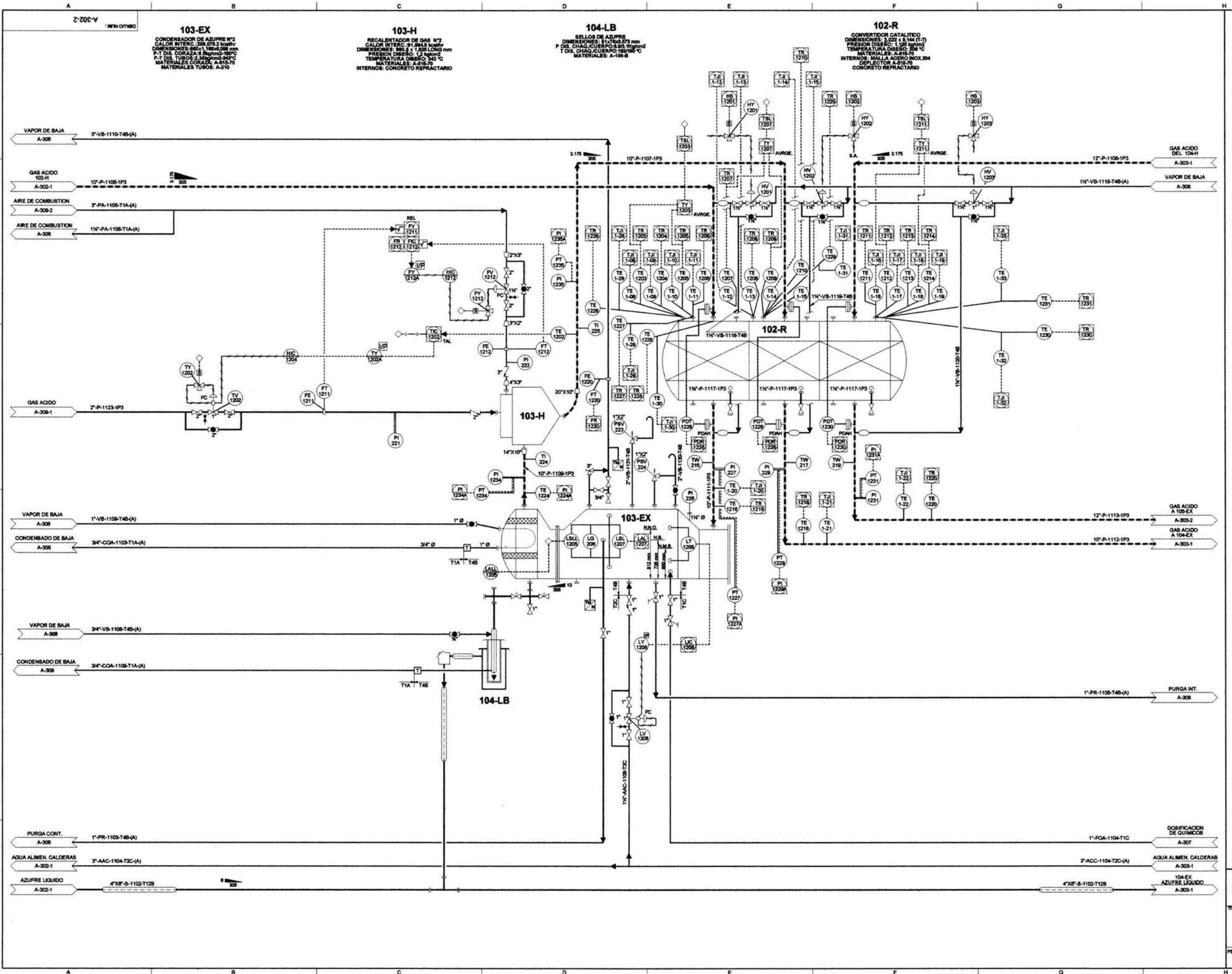
— CIRCULO DE CARGA
 - - - CIRCULO DE REACCION

PROVEEDOR: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)
 Conjunto E, Lab. 212

TITULO DEL DIBUJO: PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE II
 DIAGRAMA DE TUBERIA E INSTRUMENTACIÓN
 REACTOR TÉRMICO (TREN 1)

FECHA DE REVISIÓN: NOVIEMBRE-2002 NÚMERO DE DIBUJO: A-301-2



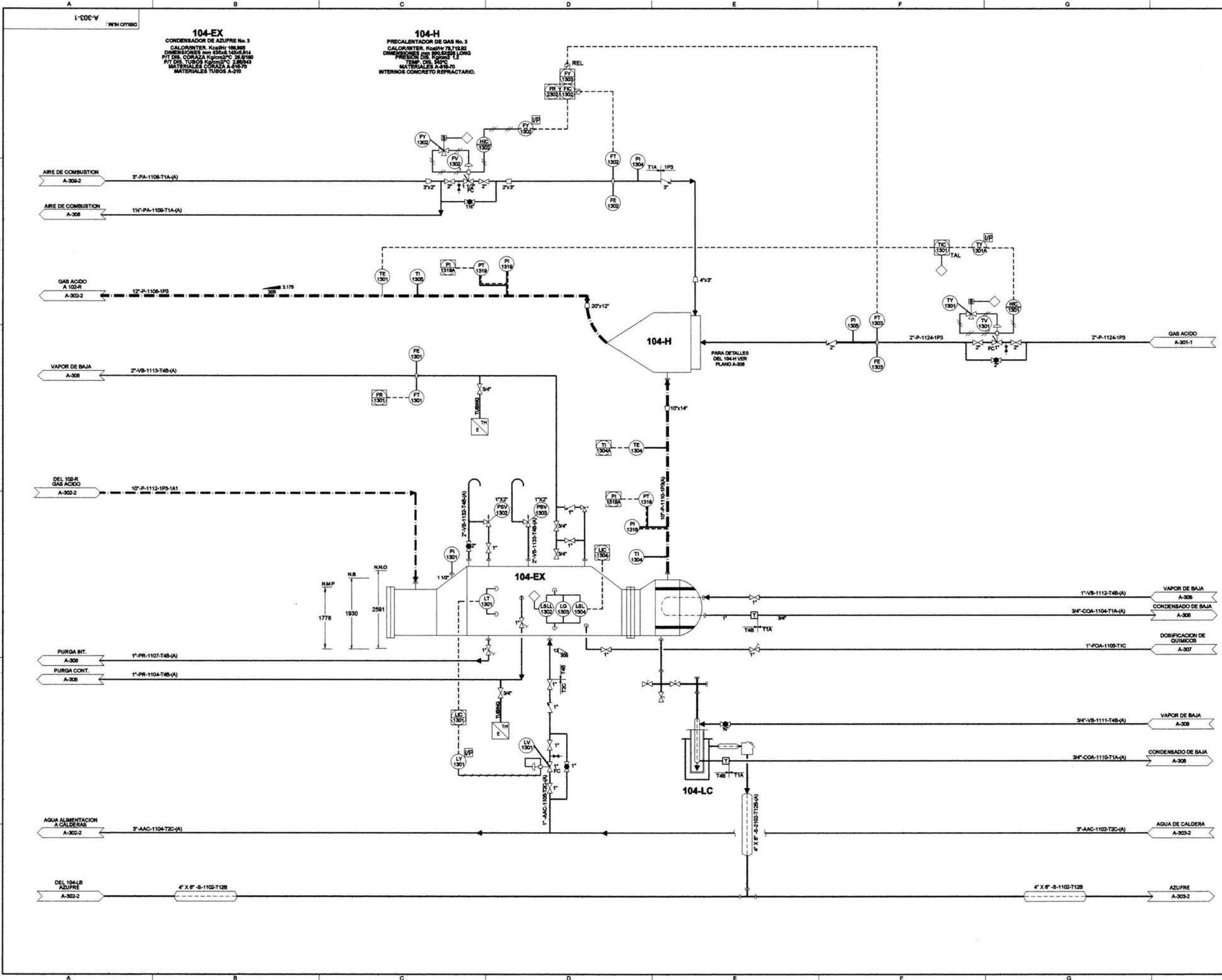


CIRCUITO DE REACCIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)
 FACULTAD DE QUÍMICA (FQ)
 CONJUNTO E, LAB. 212

TÍTULO DEL DIBUJO:
**DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
 PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE II
 CONVERTIDOR CATALÍTICO (TREN-I)**

FECHA DE REVISIÓN: **NOVIEMBRE-2002** NÚMERO DE DIBUJO: **A-302-2**



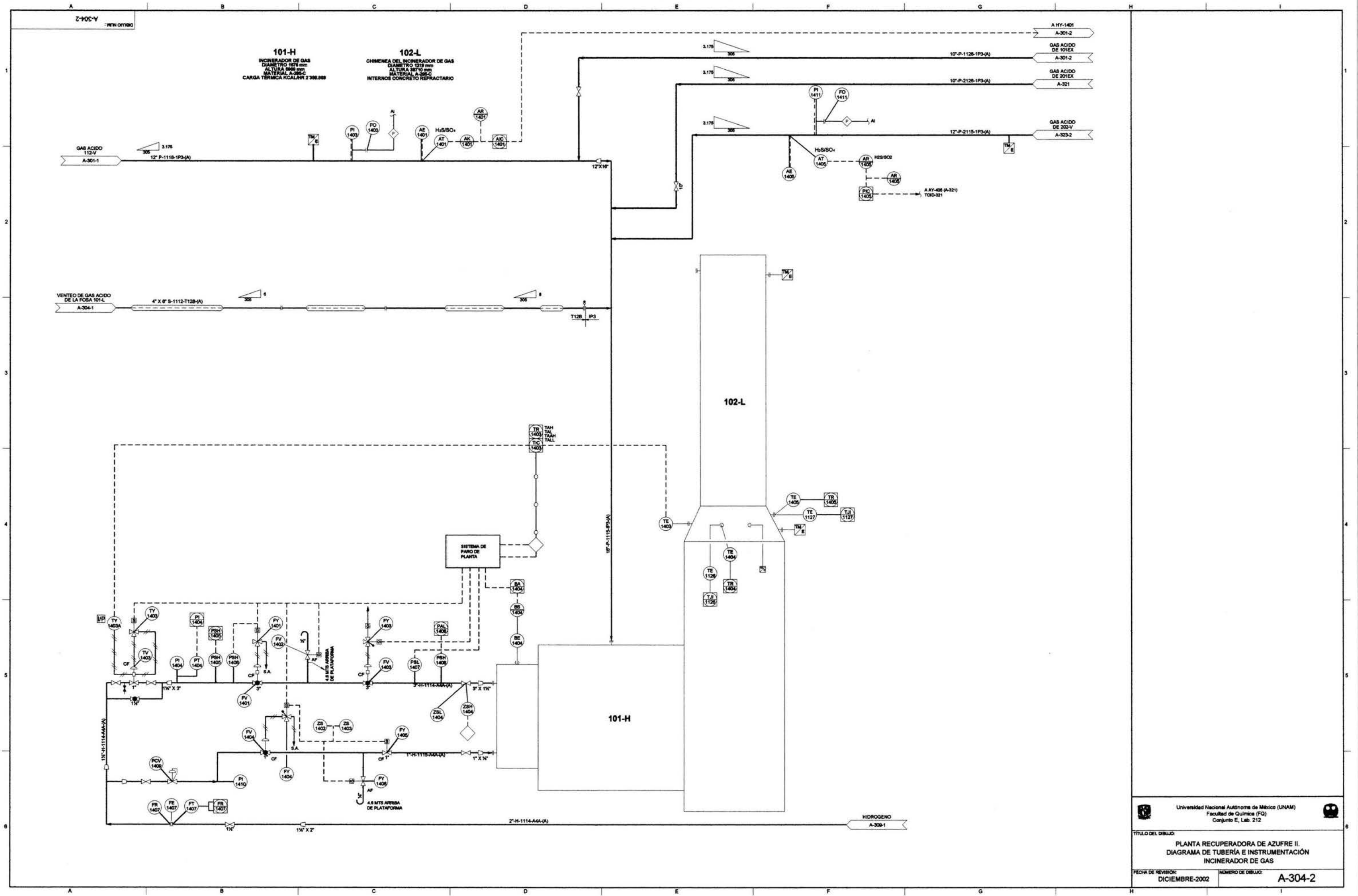
CIRCUITO DE REACCIÓN


Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Facultad de Química (FQ)
Conjunto E, Lab. 212

TÍTULO DEL DIBUJO:
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE II
CONDENSADORES DE AZUFRE (TREN-1)

FECHA DE REVISIÓN:
DICIEMBRE-2002

NÚMERO DE DIBUJO:
A-303-1



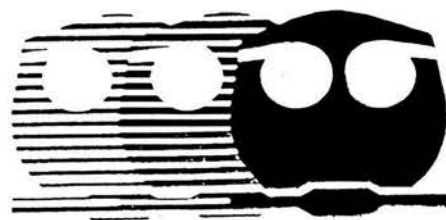

 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
 Facultad de Química (FQ)
 Conjunto E, Lab. 212

TÍTULO DEL DIBUJO:
PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE II.
DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN
INCINERADOR DE GAS

FECHA DE REVISIÓN:
 DICIEMBRE-2002

NÚMERO DE DIBUJO:
A-304-2

ANEXO C



Análisis de Riesgos HazOp



Planta: Azufre

Circuito: Recibo de ác. Sulfhídrico y separación de líquidos.

Fecha: 21 de enero de 2003.

Nodo: 1. Tanque separador de gas ácido, 101-V

Diagramas: A-301-1

Producto: Ac. Sulfhídrico y aire

Desviación: 1. Alta presión en el separador 101-V.

LOI: 250 g/cm²

LOS: 400 g/cm²

LSI:

LSS:

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
1	1. Exceso de hidrocarburos en la corriente de gas ácido.	1. Análisis rutinarios de la calidad del gas ácido. 2. Indicador PI-110 en el separador 101-V. 3. Válvula de seguridad PSV-129 del separador 101-V. 4. Alarma por alta presión PAH-114.	1. Instalar un analizador de gas de cola en la línea de salida del coalescedor 102-V. 2. Mantener comunicación con los sectores que suministran el gas ácido para no enviar hidrocarburos a la planta de azufre y mantener el gas ácido dentro de especificación.	1 (2)	2 (3)	3 (6)	C
2	2. La PV-3110 de azufre 2 y/o PV-123 de azufre 1, no controle la presión.	1. Que el quemador elevado este disponible. 2. Válvula de seguridad PSV-129. 3. Programa de mantenimiento preventivo a instrumentos.	1. Contar con las tres plantas de azufre disponibles para no ventear gas ácido a la atmósfera.	2 (3)	3 (4)	6 (9)	D



Planta: Azufre

Circuito: Recibo de ác. Sulfhídrico y separación de líquidos.

Fecha: 21 de enero de 2003.

Nodo: 1. Tanque separador de gas ácido, 101-V

Diagramas: A-301-1

Producto: Ac. Sulfhídrico y aire

Desviación: 2. Alto nivel de hidrocarburos en el separador 101-V.

LOI:

LOS:

LSI:

LSS:

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
3 1. Aporte de hidrocarburos líquidos en la corriente de gas ácido.	1. Incremento de la temperatura de operación a los hornos de reacción 101-R y 201-R. 2. Aumento de temperatura en las camas de los convertidores catalíticos 102-R y 202-R. 3. Daños al espejo oriente de las calderetas 101-EX y 201-EX. 4. Paro de planta.	1. Análisis de laboratorio. 2. Comunicación con las plantas para que tomen medidas correctivas. 3. Alarma por alto nivel LAH-1104. 4. Indicador visual de nivel LG de campo. 5. Interlock de control de nivel. 6. Válvula de seguridad PSV-129.	1. Las plantas aportadoras de gas ácido cumplan con la especificación del contenido de hidrocarburo (5% Hcs). 2. Comunicación de las plantas cuando se tenga un descontrol operacional en su sección de tratamiento de gas a la planta de azufre.	2 (2)	3 (4)	6 (7)	D
4 2. Falla de equipo de bombeo 101-P y 101-PA en mantenimiento.	1. Incremento de la temperatura de operación a los hornos de reacción 101-R y 201-R. 2. Aumento de temperatura en las camas de los convertidores catalíticos 102-R y 202-R. 3. Daños al espejo oriente de las calderetas 101-EX y 201-EX. 4. Paro de planta.	1. Programa de mantenimiento predictivo y preventivo. 2. Rotación de equipo dinámico. 3. Alarma por alto nivel LAH-1104. 4. Indicador visual de nivel LG de campo. 5. Interlock de control de nivel. 6. Válvula de seguridad PSV-	1. Contar con stock de refaccionamiento para las bombas y motores eléctricos 101-P y 101-PA.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C



Planta: Azufre

Circuito: Recibo de ác. Sulfidrico y separación de líquidos.

Fecha: 21 de enero de 2003.

Nodo: 1. Tanque separador de gas ácido, 101-V

Diagramas: A-301-1

Producto: Ac. Sulfidrico y aire

Desviación: 2. Alto nivel de hidrocarburos en el separador 101-V.

LOI:

LOS:

LSI:

LSS:

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
		129.					
5 3. Falla del interlock de arranque de las bombas 101-P y 101-PA.	1. Incremento de la temperatura de operación a los hornos de reacción 101-R y 201-R. 2. Aumento de temperatura en las camas de los convertidores catalíticos 102-R y 202-R. 3. Daños al espejo oriente de las calderetas 101-EX y 201-EX. 4. Paro de planta.	1. Programa de mantenimiento preventivo a instrumentos. 2. Arranque manual en campo de las bombas 101-P y 101-PA. 3. Alarma por alto nivel. 4. Indicador visual de nivel LG de campo. 5. Alarma por alto nivel LAH-1104. 6. Válvula de seguridad PSV 129, del 101-V.	1. Contar con stock de refaccionamiento para los instrumentos de control. 2. Continuar con el programa de revisión y calibración al circuito de protecciones.	2 (3)	3 (4)	6 (9)	D



Planta: Azufre

Circuito: Recibo de ác. Sulfhídrico y separación de líquidos.

Fecha: 21 de enero de 2003.

Nodo: 1. Tanque separador de gas ácido, 101-V

Diagramas: A-301-1

Producto: Ac. Sulfhídrico y aire

Desviación: 3. Bajo nivel en el separador 101-V.

LOI:

LOS:

LSI:

LSS:

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
6 1. Purga abierta por error humano.	1. Exposición del personal al gas ácido. 2. Contaminación ambiental. 3. Cavitación de las bombas 101-P/PA. 4. Posibilidad de incendio.	1. Capacitación del personal para que aplique los procedimientos. 2. Utilización de los equipos de protección respiratoria.	1. Mantener siempre disponibles las bombas P/PA. 2. Continuar con la capacitación del personal operativo para la toma de decisiones.	2 (3)	3 (4)	6 (9)	D



Planta: Azufre

Circuito: Reacción térmica y condensación

Fecha: 27 enero de 2003.

Nodo: 2. Reactor térmico 101-R

Diagramas: A-301-2

Producto: Aire y ácido sulfhídrico

Desviación: 1. Alta temperatura en el 101-R.

LOI: 160°C

LOS: 850°C

LSI:

LSS: 1500°C

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
7 1. Alto flujo de aire y alto contenido de hidrocarburos en gas ácido.	1. Daño del espejo de la caldereta 101-R. 2. Daños al refractario interno y aparición de puntos calientes en el 101-R. 3. Perforación en el metal base del reactor térmico. 4. Paro de planta.	1. Indicadores de temperatura TI-1101, 1102, 1103, 1105 y 1104; caldereta 101-EX. 2. Indicadores de presión PI-112 en campo y PI-1112A en el SCD.	1. Efectuar la administración al cambio para la instalación de indicadores de temperatura tipo infrarrojo en el reactor térmico 101-R.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C
8 2. Alto flujo de gas ácido y bajo flujo de aire.	1. Envío de gas ácido a la chimenea. 2. Se incrementa la ignición en la chimenea 102-L. 3. Daños al refractario y formación de puntos calientes en la chimenea. 4. Contaminación ambiental. 5. Paro de planta.	1. Alarma TAH-403 y disparo de planta por alta temperatura en la chimenea en TIC-403. 2. Relacionador aire/gas ácido, suspende el flujo de gas ácido. 3. FV-1110 bloqueo manual para suspender el envío de gas ácido.	1. Continuar con los mantenimientos preventivos y revisión al circuito de protecciones. 2. Continuar con el programa de capacitación al personal operativo sobre plan de contingencia.	2 (2)	2 (3)	4 (6)	C



Planta: Azufre

Circuito: Reacción térmica y condensación

Fecha: 27 enero de 2003.

Nodo: 2. Reactor térmico 101-R

Diagramas: A-301-2

Producto: Aire y ácido sulfhídrico

Desviación: 2. Bajo flujo de gas ácido al reactor 101-R.

LOI: 800 m³ / h

LOS:

LSI:

LSS: 1600 m³ / h

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
9 1. El check de 8" 150 lb. se quede pegado.	1. Presionamiento del cabezal de gas ácido y envío de gas ácido al desfogue y contaminación ambiental. 2. No hay producción de azufre.	1. Mantenimiento revisión y prueba a la válvula check.	1. En cada reparación programar la revisión y/o cambio de la válvula check.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C



Planta: Azufre

Circuito: Reacción catalítica

Fecha: 29 de enero de 2003

Nodo: 7. Convertidor catalítico, 102-R.

Diagramas: A-302-2

Producto: H₂S Y azufre.

Desviación: 1. Baja temperatura en el convertidor 102-R. LOI: 220°C LOS: LSI: LSS: 260°C

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
24 1. Depósito de carbón en las camas del catalizador.	1. Desactivación del catalizador. 2. Baja conversión de sulfhídrico a azufre. 3. Se reduce la vida útil del catalizador. 4. Obstrucción de las camas catalíticas. 5. Contaminación ambiental. 6. Paro de planta.	1. Indicadores de temperatura, diferenciales de presión y temperatura. 2. Indicador de presión PI-233A a la salida del recalentador 102-H. 3. Procedimiento operacional para regenerar el catalizador.	1. Evitar paros continuos para evitar la formación de carbón. 2. Continuar con la capacitación al personal operativo. 3. Regeneración de las camas del catalizador.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C
25 2. Sulfatación en la superficie del catalizador.	1. Desactivación del catalizador. 2. Baja conversión de sulfhídrico a azufre. 3. Se reduce la vida útil del catalizador. 4. Obstrucción de las camas catalíticas. 5. Contaminación ambiental.	1. Indicadores de temperatura, diferenciales de presión y temperatura. 2. Indicador de presión PI-233A a la salida del recalentador 102-H. 3. Procedimiento operacional para regenerar el catalizador.	1. Evitar paros continuos para evitar la formación de carbón. 2. Continuar con la capacitación al personal operativo.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C



Planta: Azufre

Circuito: Reacción catalítica

Fecha: 29 de enero de 2003

Nodo: 7. Convertidor catalítico, 102-R.

Diagramas: A-302-2

Producto: H₂S Y azufre.

Desviación: 2. Alta temperatura en el convertidor 102-R.

LOI: 220°C

LOS:

LSI:

LSS: 450°C

Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
26 1. Exceso de aire y azufre en el sistema.	1. Daños a la fluxería de la caldereta 101-EX. 2. Daños a la línea de salida de los recalentadores. 3. Desactivación del catalizador. 4. Alta temperatura en el coalescedor 102-V.	1. Procedimiento de regeneración del catalizador en el convertidor. 2. Iniciar la operación de la caldereta y condensadores a flujo inverso para el purgado del azufre remanente en el sistema. 3. Válvula FV-114 y PV-1132 para control de flujo y presión del aire. 4. Control de temperatura en la salida de los recalentadores al convertidor.	1. Mantener un control estricto de la temperatura en el TI-1104 a la salida de la caldereta 101-EX. 2. Continuar con el mantenimiento preventivo al circuito de instrumentos.	2 (2)	4 (3)	7 (6)	C
27 2. Alto flujo de aire y alto contenido de hidrocarburos en gas ácido.	1. Daños al refractario interno y aparición de puntos calientes en el convertidor, 102-R. 2. Perforación en el metal base del reactor térmico. 3. Contaminación ambiental. 4. Paro de planta.	1. Indicadores de temperatura en el primer paso del convertidor 102-R: TI-1120, TI-1201, TI-1202, TI-112, TI-1301, TI-1122, TI-1108 Y TI 1110; todos con alarma por alta temperatura. 2. Indicadores de temperatura en el segundo paso del convertidor: TI-1109, TI-1111, TI-1128, NTI-1129, TI-1112, TI-1113 Y TI-1115; todos con alarma por alta temperatura.	1. Parar el soplador, 101-K/KA/KB, cuando se tenga alto flujo de aire y alto contenido de hidrocarburos en el gas ácido. 2. Cerrar todas las posibles entradas de aire al reactor, recalentadores y coalescedor.	2 (2)	3 (3)	6 (6)	C



Planta: Azufre

Circuito: Reacción catalítica

Fecha: 29 de enero de 2003

Nodo: 7. Convertidor catalítico, 102-R.

Diagramas: A-302-2

Producto: H₂S Y azufre.

Desviación: 2. Alta temperatura en el convertidor 102-R.

LOI: 220°C

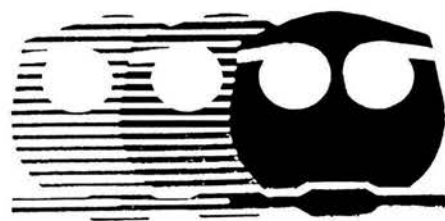
LOS:

LSI:

LSS: 450°C

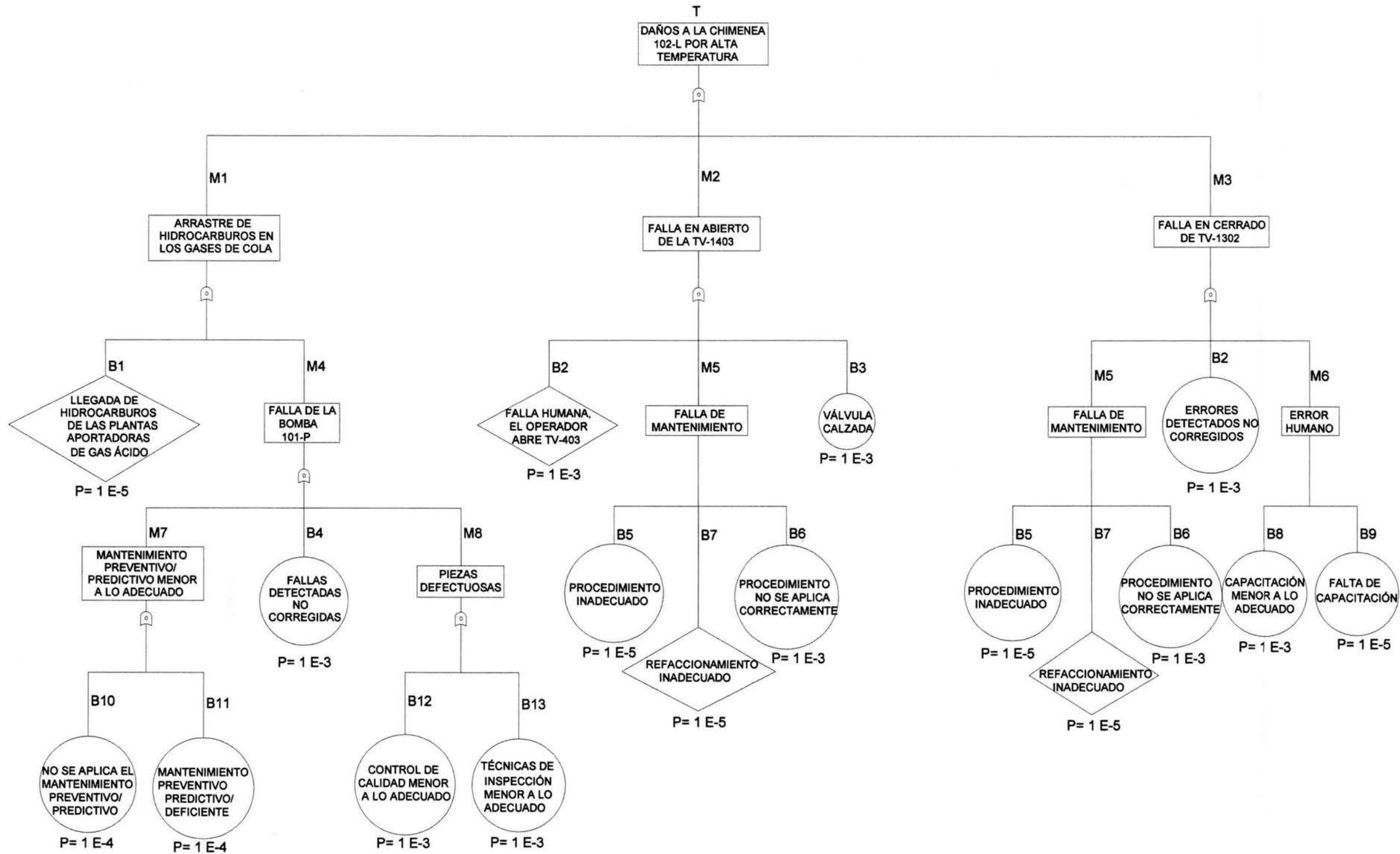
Causa	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	F	G	R	Clase
28	3. Alto flujo de gas ácido y bajo flujo de aire.	<p>3. Indicadores de temperatura en el tercer paso del convertidor: TI-1130, TI-1131, TI-1116, TI-1117, TI-1118, TI-1133 Y TI-1123; todos con alarma por alta temperatura.</p> <p>1. Alarma TAH-403 y disparo de planta por alta temperatura en la chimenea en TIC-403.</p> <p>2. Relacionador aire/gas ácido, suspende el flujo de gas ácido.</p> <p>3. FV-1110 bloqueo manual para suspender el envío de gas ácido al 101-R.</p>	<p>1. Continuar con los mantenimientos preventivos y revisión al circuito de protecciones.</p> <p>2. Continuar con el programa de capacitación al personal operativo sobre plan de contingencia.</p>	2 (2)	2 (3)	4 (6)	C
	1. Envío de gas ácido a la chimenea.						
	2. Se incrementa la ignición en la chimenea 102-L.						
	3. Daños al refractario y formación de puntos calientes en la chimenea 102-L.						
	4. Contaminación ambiental.						
	5. Paro de planta.						

ANEXO D



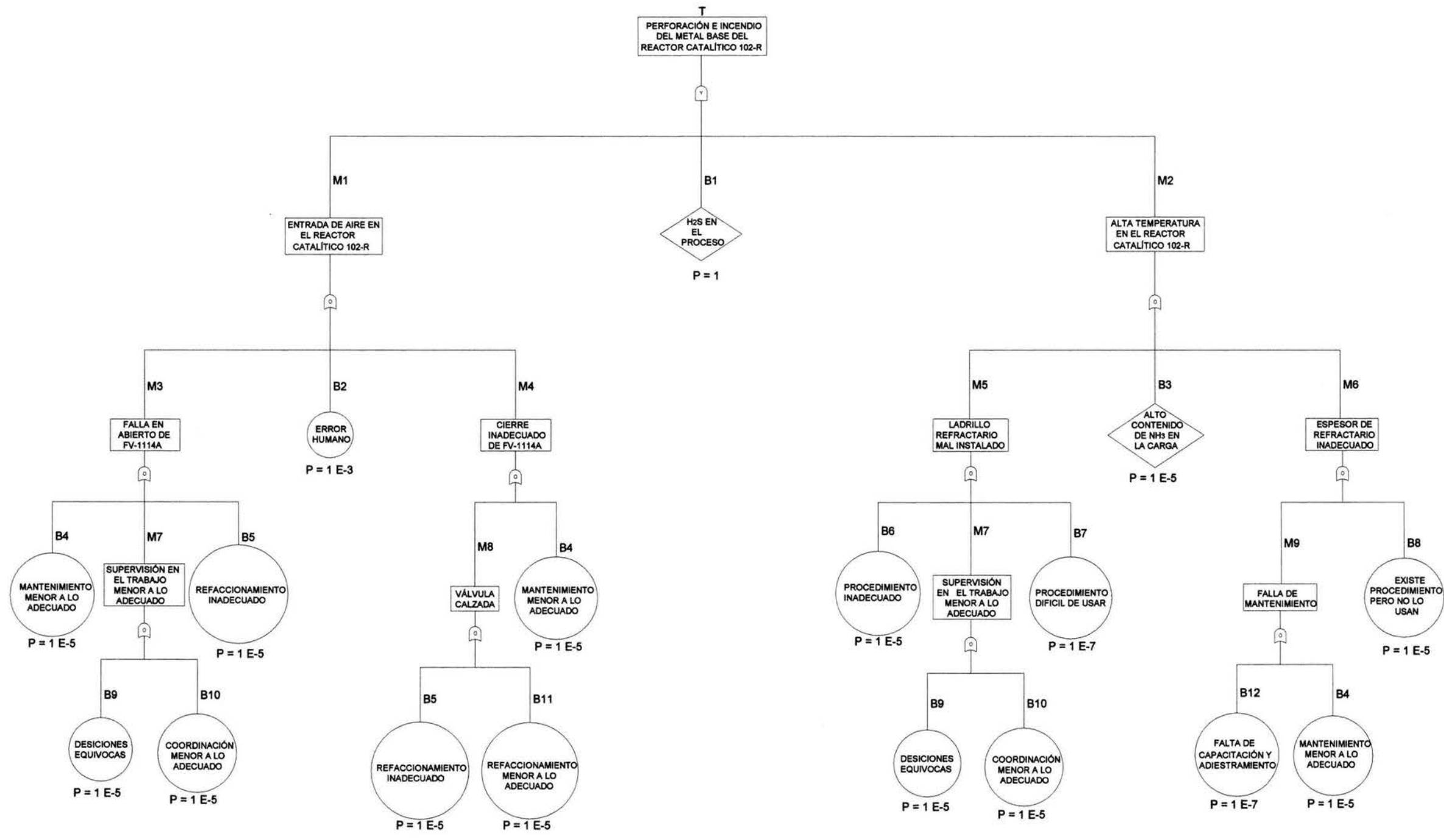
Diagramas de Árbol de Fallas

ÁRBOL DE FALLAS
RESULTADO CON EL TRATAMIENTO DE
CONJUNTOS MÍNIMOS PARA EL EVENTO: DAÑOS
A LA CHIMENEA 102-L POR ALTA TEMPERATURA
 $P = 7.24 \text{ E-}3$
 $F = 7.26 \text{ E-}3$

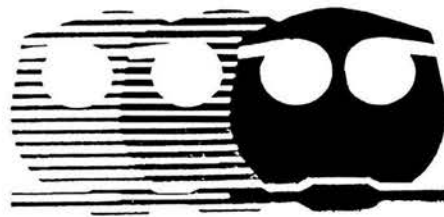


ÁRBOL DE FALLAS

RESULTADO CON EL TRATAMIENTO DE CONJUNTOS
MÍNIMOS PARA EL EVENTO: PERFORACIÓN E INCENDIO
DEL METAL BASE DEL REACTOR CATALÍTICO
P = 4.003 E-5
F = 4.00308 E-5

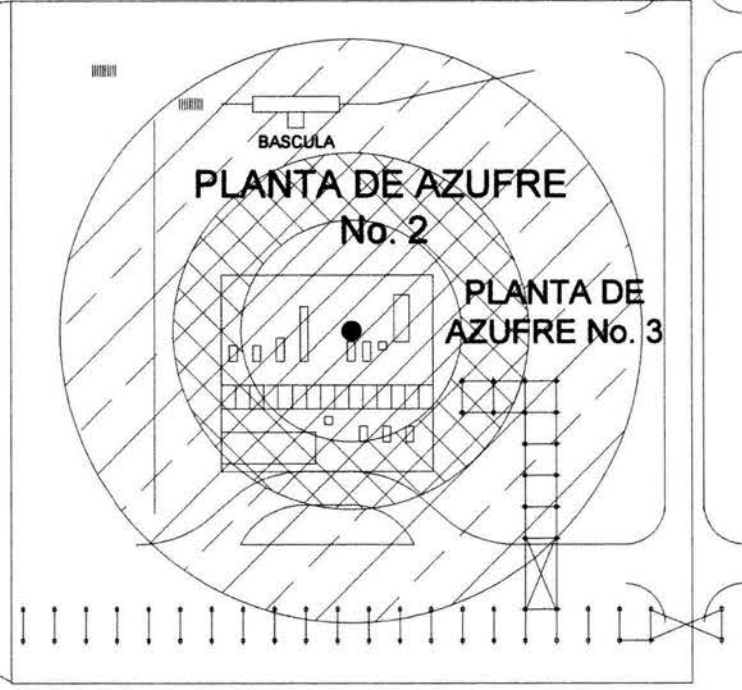
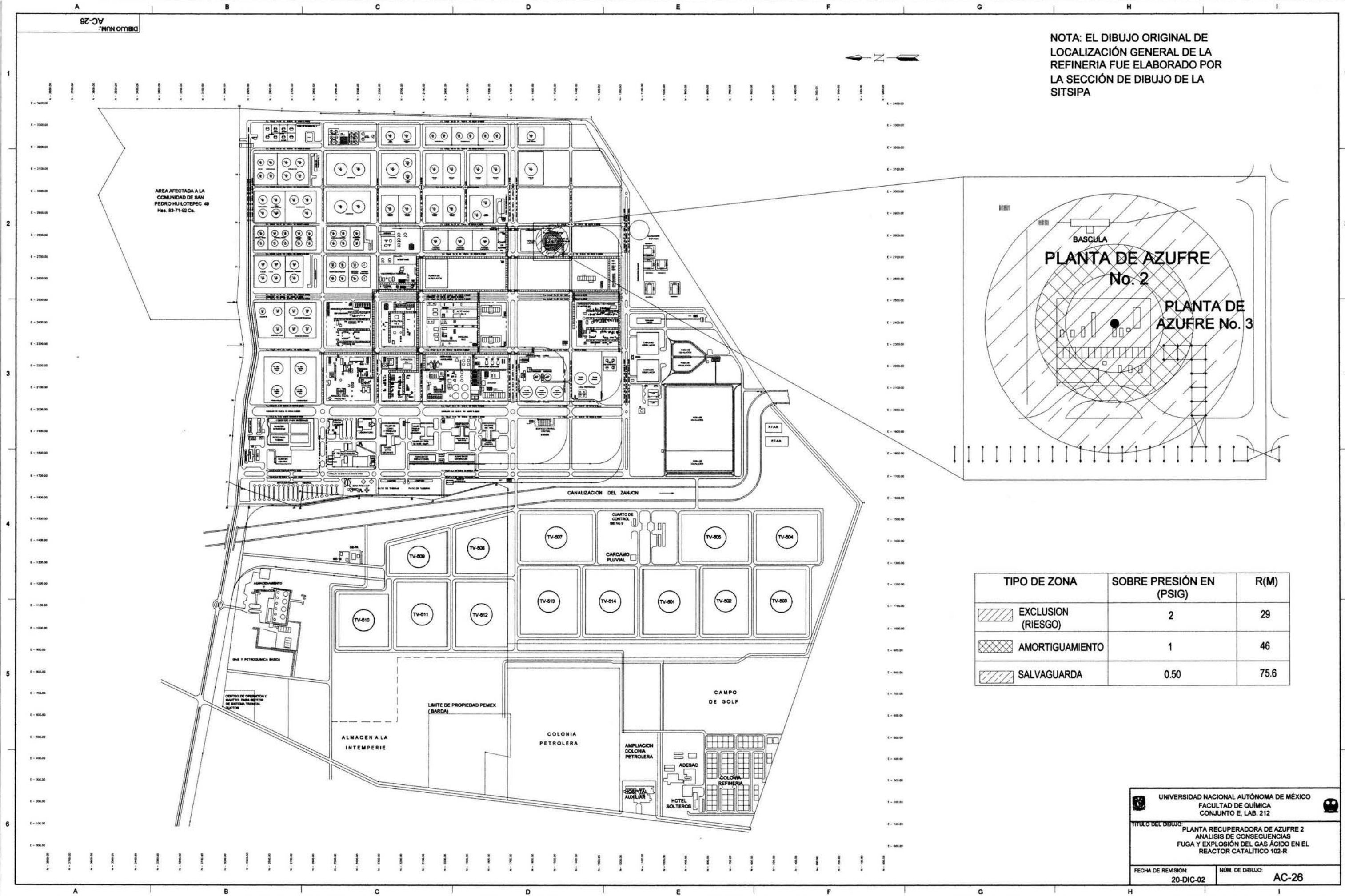
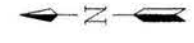


ANEXO E



Diagramas de Análisis de
Consecuencias

NOTA: EL DIBUJO ORIGINAL DE LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA REFINERÍA FUE ELABORADO POR LA SECCIÓN DE DIBUJO DE LA SITSIPA



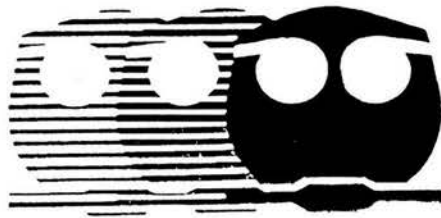
TIPO DE ZONA	SOBRE PRESIÓN EN (PSIG)	R(M)
	EXCLUSION (RIESGO) 2	29
	AMORTIGUAMIENTO 1	46
	SALVAGUARDA 0.50	75.6

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
CONJUNTO E, LAB. 212

TÍTULO DEL DIBUJO: PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE 2
ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS
FUGA Y EXPLOSIÓN DEL GAS ÁCIDO EN EL
REACTOR CATALÍTICO 102-R

FECHA DE REVISIÓN: 20-DIC-02 NÚM. DE DIBUJO: AC-26

BIBLIOGRAFÍA





BIBLIOGRAFIA

- (1) Van Velzen D
Sulphur dioxide and nitrogen oxides in industrial waste gases:
Emission, Legislation and Abatement
ESC Bruselas, Bélgica (1991)
- (2) Henry G.J. Heinke G.W.
Ingeniería Ambiental,
2ª. Ed. Prentice-Hall, España (1996)
- (3) OECD
Organization for Economic Co-operation and Development, Environmental
Performance Review
Francia (1998)
- (4) Durán C., López J., et. al.
Estimación de un inventario de emisiones de óxidos de Azufre provenientes de
fuentes fijas en las zonas críticas del país y de óxidos de nitrógeno en las
zonas metropolitanas de la Cd. de México y Guadalajara. Informe final del
proyecto Aire-02-97. Pb. UNAM/FQ/PIQAYQA-INE/DGGIA/ERF.México D.F.,
México (1998)
- (5) PEMEX (2000) www.pemex.com
- (6) Environmental Protection Agency www.epa.com
- (7) Julia Alejandra Castro Gonzalez,
Eliminación de oxidos de azufre de corrientes gaseosas. Estado del arte
Tesis 2001, Facultad de Química, UNAM
- (8) Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, www.semarnat.gob.mx





- (9) Valérie Baron
Práctica de la gestión medioambiental
1998, Ed. AFNOR
- (10) Sulfure Recovery Unit
Hydrocarbon Processing
April (1996), pag. 138
- (11) Stocchi E
Industrial Chemistry
Ed. Ellis Horwood, Washington EEUUAA (1999)
- (12) Viltrad J., Dazael C., Lecomte F.
Process for treating a gas containing hydrogen sulphide and sulphur dioxide,
comprising a step for eliminating sulphur by cooling a gaseous effluent, United
States Patent (5951961)
- (13) Lagas J.A., Borsboom J., Heijkoop
Claus process gets extra gas boost
Hydrocarbon Processing (1989)
- (14) Heisel M., Marold F., Gwinner M., (1997)
Method for the recovery of elemental sulphur from a gas mixture containing
 H_2S , United States patent (5676921)
- (15) American Institute of Chemical Institute (AIChE)
Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Hazard Evaluation
Procedures: with worked examples
2nd Ed. New York (1989)





- (16) Raúl Gustavo Ávila Gómez
Evaluación y administración de riesgos en el área de almacenamiento de gas LP
en la Refinería Fco. I Madero en Cd. Madero Tamaulipas
Tesis 2003, Facultad de Química, UNAM

- (17) Kolluru Rao V., Bartell, Steven M., et. al.
Manual de Evaluación y Administración de Riesgos
1ª Ed. McGraw-Hill Interamericana, México D.F. (1998)

- (18) Greenberg Harris R. and Crammer Joseph J. Eds.
Risk Assessment and Risk Management for Chemical Process Industries
Ed. Van Nostrand-Reinhold (1991)

- (19) Casal Joaquim, et. al.
Análisis de Riesgos en Instalaciones Industriales
Ed. Alfaomega, Colombia (2001)

- (20) American Institute of Chemical Institute (AIChE)
Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Hazard Evaluation
Procedures: Guidelines for the Chemical Process Quantitative Risk Analysis
1st Ed. New York (1989)

- (21) Manual de operación de la Planta Recuperadora de Azufre II, Refinería
"Ing. Antonio Dovalí Jaime" de Salina Cruz, Oaxaca

