

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGOS DE PROCESO EN LA
UNIDAD DESTILADORA ATMOSFÉRICA N° 3 DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ, CONFORME A LA METODOLOGÍA ANÁLISIS
CUANTITATIVO DE RIESGOS**

PRESENTADO POR:

Br. MARÍA EUGENIA PÉREZ PRIETO

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, mayo de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGOS DE PROCESO EN LA
UNIDAD DESTILADORA ATMOSFÉRICA N° 3 DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ, CONFORME A LA METODOLOGÍA ANÁLISIS
CUANTITATIVO DE RIESGOS**

ASESORES

Ing. Ind. Luis Chaparro
Asesor industrial

Ing. Quím. Yuvi Moreno
Asesora académica

Barcelona, mayo de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGOS DE PROCESO EN LA
UNIDAD DESTILADORA ATMOSFÉRICA N° 3 DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ, CONFORME A LA METODOLOGÍA ANÁLISIS
CUANTITATIVO DE RIESGOS**

JURADOS

Ing. Quím. Yuvi Moreno, Esp.

Asesora académica

Ing. Quím. Arturo Rodulfo, M.Sc

Jurado principal

Ing. Quím. Rayda Patiño, M.Sc

Jurado principal

Barcelona, mayo de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del consejo del núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al consejo universitario, para su autorización”.

DEDICATORIA

Primeramente se lo dedico a Dios ya que es el ser supremo creador de los cielos y la tierra y de todo lo que en ellos hay, por haberme permitido empezar y culminar mi carrera con éxito y por estar en cada rincón de mi vida otorgándome miles de bendiciones.

En segundo lugar se lo dedico a mis padres, hermanos, sobrinos, tíos, primos, abuelos y a Raúl por todo el apoyo que me han dado durante estos duros y hermosos años de estudio, por haber compartido conmigo sus conocimientos, sonrisas, consejos, por animarme y por siempre estar allí para mí incondicionalmente.

Para todos ustedes es este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a la Universidad de Oriente, pues fue allí donde me formé como profesional y donde muchos de los sueños que tenía se hicieron realidad.

Quiero agradecer a todos los profesores del departamento de Ingeniería Química en especial a: prof. Rodolfo Arturo, por ser quien abrió mi entendimiento hacia lo que es una industria, gracias profe por sus maravillosas clases aprendí demasiado y me han sido muy útiles todas sus enseñanzas. A la prof. Yuvi Moreno, mi asesora académica, gracias por el tiempo que se ha tomado en ayudarme a desarrollar este trabajo, usted es un gran ejemplo a seguir y le estaré siempre en deuda.

Gracias a la empresa PDVSA REFINACIÓN ORIENTE por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de desarrollar mi tesis en la refinería, esos nueve meses fueron de gran aprendizaje y conocimiento.

Al Ing. Luis Chaparro, mi asesor industrial, gracias por estar conmigo en mis pasantías, por ayudarme en todo lo que necesité y en lo que te pedí, gracias por todos tus consejos, tanto en el campo laboral, como en el personal. Te estaré eternamente agradecida por todo.

Al sr. Alexander Osio, bastante que te pedí ayuda y siempre supiste como lograr lo que te pedía. Contigo aprendí el rol de un ing. en la industria, gracias por toda tu ayuda y por recibirme en los primeros días en los que me sentía pérdida, siempre estuviste presente en todos los momentos que

necesite recoger data en el área y siempre me tuviste una respuesta a los diferentes problemas que te plantee, así como la solución, muchas gracias.

Al Ing. Marcos Vieira, usted fue mi primer instructor, me acompañó las primeras semanas de mi trabajo, me explicó lo que era un ACR y me brindó toda la confianza y amistad que necesité para superar muchos de los obstáculos. Muchas gracias.

Al Ing. Simón London por ser mi compañero de oficina y por todos los consejos que me distes, muchas gracias.

A toda la Gerencia de Seguridad Industrial de la refinería Puerto La Cruz, por hacer de esta experiencia lo máximo, gracias por tanta atención y buen trato, son seres humanos excelentes.

A mis amigos de pasantía: Jhonny Serrano, Nathaly Boada, Eduardo Hernández, Miguel Caraballo, Melly Rodríguez, Vanessa Guerra, gracias por toda la amistad que me brindaron, por los momentos de risa y relax en todos los almuerzos, nunca los olvidaré.

Finalmente, pero no menos importante a: Danilo, Arlenis, Vilmarys, Javier, Antonio, Jahir, Karen, mis compañeros de clases. Gracias muchachos por todos los momentos que hemos compartido en esta carrera, gracias por su amistad y apoyo, gracias por tu positivismo siempre, aun cuando las cosas se tornaban difíciles, los quiero mucho.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron en este trabajo y en el desarrollo de María Eugenia como profesional. A todos Muchísimas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis cuantitativo de riesgos a la unidad destiladora atmosférica DA-3 de la refinería Puerto La Cruz, con el fin de estimar los niveles de riesgos a los cuales están expuestos los trabajadores en la planta y áreas cercanas a ella. Con este fin se procedió a identificar los escenarios que pudieran generar eventos peligrosos asociados a fugas de sustancias inflamables, combustibles y/o tóxicas dentro de la planta codificándolos según el área donde pueden presentarse. Una vez definidos estos escenarios se establecieron las consecuencias para conocer los eventos y magnitudes que pudieran presentarse de acuerdo a dos estabildades atmosféricas seleccionadas previamente según Pasquill-Guifford las cuales fueron las siguientes: estabilidad atmosférica D, que representa atmósferas neutras y estabilidad atmosférica F, que representa atmósferas estables, logrando obtener como evento más severo el de explosión representado por el escenario PCR-8 para ambas estabildades atmosféricas. Hecha la estimación de consecuencias se realizó el cálculo de frecuencias de ocurrencia de cada uno de los eventos obtenidos suponiendo que los eventos iniciadores han ocurrido, dando como resultado que el evento más frecuente es una piscina de fuego representada por el escenario GAS-2 para ambas estabildades atmosféricas. Completadas las etapas de estimación de consecuencias y cálculo de frecuencias de ocurrencia se determinaron los niveles de riesgos de la planta multiplicando ambos resultados y representando sobre el plano de planta los resultados obtenidos tomando como base los criterios de tolerancia establecidos por PDVSA en su guía IR-S-02, encontrando que el nivel de riesgo individual del primer piso de la unidad DA-3 para el 1% de fatalidades y para la estabilidad atmosférica D es

reducible, mientras que para la estabilidad atmosférica F es mínimo. Adicionalmente se evaluó el diseño desde el punto de vista de seguridad en la unidad con la finalidad de conocer si éste está de acuerdo a lo establecido en las normas de seguridad para el diseño de una planta química.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	viii
TABLA DE CONTENIDO	x
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades de la empresa	1
1.1.1 Unidad de destilación DA-1.....	3
1.1.2 Unidad de destilación DA-2.....	4
1.1.3 Unidad de destilación DA-3.....	4
1.1.4 Unidad de craqueo catalítico.....	4
1.1.5 Unidad de alquilación.....	5
1.1.6 Unidad de aminas	5
1.1.7 Servicios industriales	5
1.1.8 Unidad de hidrot ratamiento de nafta (unidad 19).....	5
1.1.9 Unidad de reformación RCC (unidad 20).....	6
1.1.10 Unidad de hidrot ratamiento de diesel (unidad 45).....	6
1.1.11 Unidad de despojamiento de aguas agrias (unidad 46).....	6
1.1.12 Unidad de recuperación de azufre (unidad 48).....	7
1.1.13 Unidad de tratamiento gas de cola-clauspol incineración (unidad 49).....	7
1.1.14 Sistema de recuperación de condensado	7
1.1.15 Sistema de gas combustible	7
1.1.16 Sistema de gas inerte	8
1.1.17 Sistema de mechorrio	8
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos específicos	11

CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO	12
2.1 Antecedentes.....	12
2.2 Descripción del proceso	14
2.3 Análisis cuantitativo de riesgos.....	19
2.4 Identificación de peligros	20
2.5 Análisis de consecuencias	21
2.5.1 Escenarios	21
2.5.2 Selección de los tamaños de orificios de fugas.....	22
2.5.3 Criterios de daños	23
2.5.4 Ecuaciones PROBIT	24
2.5.5 Modelos matemáticos para la estimación de consecuencias.....	24
2.6 Estimación de frecuencias de eventos peligrosos	49
2.7 Cuantificación del riesgo	50
2.7.1 Riesgo individual	51
2.7.2 Riesgo social.....	51
2.8 Criterios de tolerancia.....	51
CAPÍTULO III	53
DESARROLLO DEL TRABAJO	53
3.1 Identificación de los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3.....	53
3.2 Establecimiento de las consecuencias de los posibles daños ocurridos por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes	54
3.2.1 Variables de proceso	54
3.2.2 Condiciones meteorológicas	56
3.2.3 Orificios de fuga	57
3.2.4 Dosis equivalentes de daños	58
3.3 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos peligrosos de la unidad destiladora atmosférica DA-3.....	61
3.4 Determinación de los niveles de riesgos individual y/o social existentes en la unidad destiladora atmosférica a estudiar	70
3.5 Evaluación del diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad destiladora atmosférica DA-3 mediante el uso de mejores prácticas de diseño.....	71

CAPÍTULO IV.....	83
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
4.1 Identificación de los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3.....	83
4.2 Establecimiento de las consecuencias de los posibles daños ocurridos por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes	89
4.3 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos peligrosos de la unidad destiladora atmosférica DA-3.....	91
4.4 Determinación de los niveles de riesgos individual y/o social existentes en la unidad destiladora atmosférica a estudiar	93
4.5 Evaluación del diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad destiladora atmosférica DA-3 mediante el uso de mejores prácticas de diseño.....	102
4.6 Conclusiones	115
4.7 Recomendaciones.....	118
BIBLIOGRAFÍA.....	120
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	123

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades de la empresa

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) es la compañía encargada de la explotación del petróleo y sus derivados en Venezuela. Fundada en 1975, ésta logra ser considerada, gracias a su calidad y responsabilidad, como una empresa confiable en el proceso de suministro de grandes volúmenes de crudo a escala mundial. Independientemente de los problemas que se han presentado dentro de la empresa en los últimos tiempos, PDVSA se consolida como una de las principales compañías petroleras multinacionales y ha sido la principal responsable de la exploración, explotación, refinación, transporte y distribución de hidrocarburos.

También promueve los negocios de química, petroquímica y carbón, a fin de obtener una alta rentabilidad en el mercado, que permita generar beneficios al país, a través de la realización de actividades en las áreas de petroquímica, investigación, desarrollo tecnológico y adiestramiento en sectores vinculados con la industria energética, así como otras áreas.

Por los cambios incesantes del mercado internacional, PDVSA como corporación del nuevo siglo e integrante de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), debe mantenerse a la vanguardia de los grandes avances, sean estos en el ámbito económico, tecnológico, gerencial, ambiental, en fin todos aquellos que le permitan consolidarse en el mercado mundial como una empresa estable y de excelente nivel de calidad en sus

productos y procesos, para ello es de vital importancia mantener todos sus componentes de producción en las mejores condiciones de servicio, dependiendo de ellos todo el potencial de esta empresa.

La refinería Puerto La Cruz está ubicada en la costa nororiental del país al este de la ciudad de Puerto La Cruz en el estado Anzoátegui; tiene facilidades de acceso desde el mar Caribe y está conectada por oleoductos con los campos de producción de oriente. La conforman las instalaciones de Puerto La Cruz, El Chaure y San Roque (a 40 km de Anaco, vecina a la población de Santa Ana, estado Anzoátegui). En la figura 1.1 se muestra la ubicación geográfica de las refinerías Puerto La Cruz y San Roque.

Ésta cuenta con una capacidad nominal para procesar 200.000 barriles por día (200 Mbd) de crudo en sus tres unidades de destilación, de los cuales 45% corresponde a crudo pesado.

La dieta de la refinería es variada, entre los principales crudos se tienen:

- Anaco Wax – Santa Bárbara con una gravedad API promedio de 42° y 38° respectivamente.
- Mesa con una gravedad API de 30°.
- Leona con una gravedad API de 24°.
- Merey con una gravedad API de
- Insumos a procesos como lo son isobutano, nafta pesada, gasóleo de vacío y residuo desparafinado.
- Insumos a mezcla como lo son el gas natural, la gasolina natural, naftas, gasolinas sin plomo y destilados.



Figura 1.1. Ubicación geográfica de las refinerías Puerto La Cruz y San Roque (PDVSA, 2006).

Las unidades fundamentales de proceso se describen a continuación:

1.1.1 Unidad de destilación DA-1

La unidad de destilación atmosférica DA-1 fue diseñada para procesar 44 Mbd de crudo con una gravedad promedio de 30° API, sin embargo debido a las mejoras realizadas en la unidad, se aumentó su capacidad nominal a 80 Mbd.

1.1.2 Unidad de destilación DA-2

La unidad de destilación atmosférica DA-2 estaba diseñada (según capacidad de equipos) para procesar una carga de 90 Mbd de crudo Merey con un rango de gravedades de 15,5-16,5 °API sin embargo, con el reemplazo del horno existente sólo puede manejar hasta 72 Mbd. Otros crudos que se han procesado en la unidad son: Mesa Monagas y Guafita, cada uno de 30° API (carga: 30 Mbd), y una mezcla Mesa-Merey denominada Leona de 22-24 °API (carga: 45 Mbd).

1.1.3 Unidad de destilación DA-3

La unidad DA-3 está ubicada en la refinería El Chaure, a orillas de la bahía de Bergantín a 5 km de Puerto La Cruz, siendo su diseño original fue para procesar 40 Mbd de crudo mediano y pesado entre 22 y 30° API. En el año 1968 se ejecutaron algunas modificaciones para procesar crudo liviano y extraliviano (40-42 °API). Actualmente se procesa crudo Anaco Wax y Santa Bárbara de 39 y 42°API, respectivamente y se le incorpora residuo desparafinado de la refinería San Roque.

1.1.4 Unidad de craqueo catalítico

La unidad de craqueo catalítico, procesa actualmente una mezcla formada por gasóleo atmosférico proveniente de la unidad de destilación DA-1, residual de crudo Anaco Wax y/o Santa Bárbara proveniente de la unidad de destilación atmosférica DA-3 y VGO foráneo. Los productos principales de la reacción de craqueo catalítico son: gas seco, olefinas, gasolina, aceite catalítico liviano, aceite catalítico pesado y aceite decantado.

1.1.5 Unidad de alquilación

El proceso de alquilación consiste en la combinación de las olefinas (compuestos de hidrocarburos con doble enlace) proveniente de la unidad de craqueo catalítico con isobutanos en presencia de un catalizador (ácido fluorhídrico) para producir compuestos parafinicos altamente ramificados en el rango de 7 a 8 átomos de carbono.

1.1.6 Unidad de aminas

La unidad de endulzamiento de gases ácidos está diseñada para remover el sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y porciones de sulfuro de carbonilo de los gases producidos en la planta de desintegración catalítica.

1.1.7 Servicios industriales

Los servicios industriales en el área de Puerto La Cruz y El Chaure están conformados por las siguientes unidades: sistemas de agua potable, agua de enfriamiento, ósmosis inversa, generación de vapor, aire comprimido, generación eléctrica, tratamiento de aguas servida y sistema de tratamiento de efluentes de proceso.

1.1.8 Unidad de hidrotratamiento de nafta (unidad 19)

La unidad de hidrotratamiento de nafta (NHT) está diseñada para procesar una carga mínima de 17,5 Mbd y una carga máxima de 35 Mbd. El proceso de NHT es un proceso de refinación catalítica, el cual con la ayuda de un catalizador y una corriente de gas rica en hidrógeno busca

descomponer los compuestos azufrados, nitrogenados, oxigenados y halogenados, además satura las olefinas y remueve los metales presentes en la corriente de hidrocarburos (naftas).

1.1.9 Unidad de reformación RCC (unidad 20)

La unidad de reformación por regeneración catalítica continua está diseñada para una alimentación de 35.000 BPSD y para producir un reformado que tenga un índice de octanaje en el rango de 95-102. La sección de regeneración está diseñada para regenerar 2.000 lb/h de catalizador, siendo la alimentación a ésta unidad la nafta tratada que proviene de la unidad NHT.

1.1.10 Unidad de hidrotreatmento de diesel (unidad 45)

La unidad original está diseñada para tratar cinco tipos de cargas provenientes de las unidades de destilación atmosférica y al vacío en dos secciones de reacción combinadas, con la finalidad de desulfurar y saturar los aromáticos.

1.1.11 Unidad de despojamiento de aguas agrias (unidad 46)

Esta unidad tiene una capacidad de 250 galones por minuto (GPM) y recibe todos los flujos de aguas agrias generados por las unidades de hidrotreatmento de nafta, unidad de amina y de recuperación de azufre.

1.1.12 Unidad de recuperación de azufre (unidad 48)

El propósito de esta unidad es el tratamiento de gases ácidos y agrios provenientes de tres unidades de proceso, a través de la oxidación parcial de H₂S (sulfuro de hidrógeno) y NH₃ (amoníaco) contenido en las corrientes de gases, para producir azufre elemental.

1.1.13 Unidad de tratamiento gas de cola-clauspol incineración (unidad 49)

El propósito de esta unidad es la eliminación de la parte principal de los compuestos de azufre presentes en el gas de cola producto de la unidad de recuperación de azufre Claus aguas arriba.

1.1.14 Sistema de recuperación de condensado

El sistema de recuperación de condensado fue diseñado con el propósito de: recolectar el condensado de baja presión producido en las nuevas unidades de proceso y en el sistema de agua de enfriamiento, incluyendo futuras unidades de proceso; suministrar condensado a las nuevas unidades de proceso incluyendo futuras unidades; y enviar el condensado al sistema de condensado existente.

1.1.15 Sistema de gas combustible

El sistema de gas combustible en las plantas de hidropcesos está diseñado con el siguiente propósito: recoger en el tambor de mezcla el gas combustible producido en las unidades de proceso nuevas incluyendo

unidades futuras y suministrar gas combustible a 125 psig a las unidades de proceso nuevas incluyendo unidades futuras.

1.1.16 Sistema de gas inerte

El sistema de gas inerte está diseñado para: suministrar nitrógeno de alta pureza a la unidad 20; suministrar nitrógeno de baja pureza a todos los usuarios excepto a la unidad 20; suministrar nitrógeno de baja pureza como respaldo al sistema nitrógeno de alta pureza.

1.1.17 Sistema de mechorrio

El nuevo sistema de mechorrio ha sido diseñado para deshacerse de los hidrocarburos y del gas ácido durante el arranque, operación normal, emergencias y proceso fuera de especificación. (PDVSA, 2006)

1.2 Planteamiento del problema

La refinería Puerto La Cruz entra en operación en el año 1950. Por su fácil acceso al mar Caribe, por la conexión con los mercados internacionales y por su proximidad a los más importantes campos de producción del oriente venezolano, esta refinería sigue manteniendo su alto valor estratégico.

Su flexibilidad operativa está soportada en tres unidades de destilación atmosférica (DA-1 y DA-2 en Guaraguao, DA-3 en El Chaure), una unidad de desintegración catalítica (FCC), una unidad de alquilación, una planta de tratamiento de efluentes de proceso, sistema de almacenaje y siete muelles de embarque de crudo y producto.

La unidad de destilación atmosférica DA-3, antes conocida como refinería El Chaure, está ubicada en la bahía de Bergantín, a 5 kilómetros de Puerto La Cruz. Fue diseñada para procesar 40 MBD de crudo pesado y mediano entre 22 y 30 °API. En el año 1968 se realizaron modificaciones con el principio fundamental de procesar crudos livianos y extralivianos entre 40 y 42 °API. Actualmente procesa crudo Anaco Wax y Santa Bárbara de 42 y 39 °API, respectivamente. Los productos principales de esta unidad son: gasolina estabilizada, querosén, diesel pesado y residual de bajo azufre.

Desde el punto de vista operacional, la unidad DA-3, es una unidad de fraccionamiento atmosférico, provista de un tren de calentamiento, una torre preflash, una torre fraccionadora principal, dos despojadores, un horno tipo cilíndrico vertical y de tiro natural, equipos rotativos en donde cada bomba eléctrica tiene un auxiliar de turbina de vapor y una torre estabilizadora de gasolina.

Actualmente el sistema integral de riesgos (SIR) de la refinería Puerto La Cruz, se encuentra en la fase de elaboración, implantación y aplicación integrada de sus elementos, con el propósito de evitar la ocurrencia y/o reducir las consecuencias de escapes de sustancias tóxicas, reactivas, inflamables, combustibles o explosivas que puedan ocasionar accidentes severos, mayores o catastróficos en términos de daños humanos dentro y fuera de los límites de propiedad originados por los procesos, plantas y/o áreas de la refinería.

Debido a que la seguridad en las instalaciones de las industrias petroleras y petroquímicas debe ser abordada como una parte integral del trabajo, iniciada con las evaluaciones de factibilidad y conceptualización de los procesos, continuando a través de las diferentes fases del diseño,

construcción y arranque y manteniéndose de igual forma durante toda la vida operativa de las instalaciones e inclusive hasta sus etapas de cierre, desmantelamiento o clausura, el SIR de la refinería solicitó la estimación de los niveles de riesgos de proceso de la unidad destiladora atmosférica DA-3 a través de la metodología análisis cuantitativo de riesgos (ACR). Estos deben ser revisados y actualizados de acuerdo a la criticidad de la instalación y en ningún caso deberán excederse de 10 años.

Para lograr dicha estimación se realizó una evaluación sistemática de la unidad DA-3, comenzando con la identificación de los posibles eventos peligrosos empleando la metodología de análisis preliminar de peligros (APP), estimando las consecuencias de los posibles daños a través del simulador Canary 4.3, así como también la frecuencia de ocurrencia de los eventos previamente identificados a través de la metodología de árboles de fallas y eventos, para poder estimar los posibles daños al personal, instalaciones y terceros como consecuencia de escapes de sustancias tóxicas, combustibles e inflamables y así poder cuantificar el nivel de riesgo individual y social implícito y poder proponer una revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad haciendo uso de normas o mejores prácticas de diseño.

La presente evaluación comprende las secciones de alimentación, precalentamiento, calentamiento, fraccionamiento, despojamiento, estabilización y cada una de las líneas de distribución de los productos de la planta dentro de los límites de batería de la misma.

La importancia de este trabajo está basada principalmente en incrementar los niveles de seguridad en la unidad destiladora atmosférica n° 3, ya que estos análisis permiten jerarquizar los eventos no deseados, la

toma de decisiones gerenciales que conlleven a un aumento de dichos niveles a través de la aplicación de medidas de reducción y mitigación de riesgos que sean óptimos y rentables y en consecuencia, consolidar el conjunto de preceptos establecidos por la norma de PDVSA hasta la actualidad, ya que dichos preceptos han de evolucionar como lo hacen las aplicaciones tecnológicas; y en una industria que realiza actividades altamente riesgosas, como en la de hidrocarburos, la seguridad no es opcional, sino que constituye un requisito inexcusable.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estimar los niveles de riesgos de proceso en la unidad destiladora atmosférica n° 3 de la refinería Puerto La Cruz, conforme a la metodología análisis cuantitativo de riesgos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3.
2. Establecer las consecuencias de los posibles daños ocurridos por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes.
3. Calcular la frecuencia de ocurrencia de eventos peligrosos de la unidad destiladora atmosférica a evaluar.
4. Determinar los niveles de riesgos individual y/o social existentes en la unidad destiladora atmosférica a estudiar.
5. Evaluar el diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad destiladora atmosférica DA-3 mediante el uso de mejores prácticas de diseño.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Araque y Luna, estimaron los niveles de riesgos en la unidad de hidrotreatmento de diesel (unidad 45-HDT) de la refinería Puerto La Cruz, empleando la metodología análisis cuantitativo de riesgo. Se identificaron los distintos eventos peligrosos para la selección de escenarios empleando la técnica análisis preliminar de peligros (APP), se calcularon tanto las consecuencias como las frecuencias y de esta manera se hallaron los niveles de riesgos de dicha unidad (Araque y Luna, 2007).

Suárez, desarrolló un análisis cuantitativo de riesgos de los procesos en la planta despojadora de aguas agrias (unidad 46) de la refinería Puerto La Cruz, de acuerdo a lo establecido en la guía PDVSA IR-S-02 "Análisis Cuantitativo de Riesgos", con el objetivo de identificar los peligros, cuantificarlos y determinar el riesgo individual, a fin de compararlo con los criterios de tolerancia de PDVSA (Suárez, 2007).

Vieira, realizó un análisis cuantitativo de riesgos de los procesos en la planta de hidrotreatmento de nafta (unidad 19) en la refinería Puerto La Cruz, para lo cual se basó en lo establecido en la guía PDVSA IR-S-02 "Análisis Cuantitativo de Riesgos" del manual ingeniería de riesgo. En el análisis se identificaron los posibles eventos peligrosos para lo cual seleccionaron nada mas que los escenarios asociados a la liberación incontrolada de productos peligrosos. También determinó el riesgo individual

para operadores y terceros y los comparó con los criterios de tolerancia establecidos por PDVSA (Vieira, 2007).

Gutiérrez y Zambrano, realizaron un análisis de riesgos de los procesos a la unidad de destilación atmosférica DA-2, de acuerdo a lo establecido en la guía PDVSA SI-S-01. Para ello, evaluaron los sistemas pasivos y activos de las instalación DA-2 (separación entre equipos e instalaciones, sistema de salvaguarda, sistemas de detección, prevención y protección contra incendios, clasificación eléctrica de áreas, entre otros) comparándolos con las últimas guías PDVSA del manual de ingeniería de riesgo y normativas internacionales (Gutiérrez y Zambrano, 1999).

Considerando la importancia de la realización de un análisis cuantitativo de riesgos (ACR) para una instalación tanto propuesta como existente se plantea la elaboración de uno (ACR) en la unidad DA-3. La semejanza de estos antecedentes con el presente trabajo está en la realización de un análisis cuantitativo de riesgos de los procesos. La similitud con Araque, Luna, Suárez y Vieira está en la identificación de peligros a través de la metodología análisis preliminar de peligros así como el cálculo de consecuencias y frecuencias y adicionalmente con Vieira la selección de escenarios asociados a la liberación incontrolada de productos peligrosos. La analogía con Gutiérrez y Zambrano esta en la evaluación del diseño de la unidad verificando la separación entre equipos e instalaciones y las diferencias con respecto a todos los autores anteriores está en que no existe un estudio de análisis cuantitativo de riesgos para la unidad DA-3 y además el cálculo del riesgo individual se realizará utilizando como dosis equivalentes de daños no sólo el 1% de fatalidades sino también el 50% y 99% de fatalidades, lo que permite cubrir el 99% de probabilidades de fatalidades en tres rangos manejables.

2.2 Descripción del proceso

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo de proceso de la unidad destiladora atmosférica DA-3 la cual procesa crudo Anaco Wax y Santa Bárbara. El crudo proviene de los tanques de almacenamiento 10 ó 18 y es descargado en la unidad por medio de las bombas P-1/P-1A, a través de los intercambiadores del tren de precalentamiento (E-1E/D/C/B/A) por el lado tubo respectivamente, para extraer calor de la corriente de reflujo de nafta (reflujo de tope de la torre fraccionadora V-3). Luego pasa por los intercambiadores E-3B/3A (lado tubo) para absorber calor de la corriente de querosén procedente de la torre despojadora V-5.

Seguidamente, el crudo pasa por el intercambiador E-8 (lado tubo) para aprovechar el calor de la corriente de diesel despojado (producto de fondo de la torre despojadora V-4), pasa por el intercambiador E-18 (lado casco), para retirar calor de la corriente de residual proveniente de la torre fraccionadora V-3 y por los intercambiadores E-6B/6A (lado tubo) para absorber calor de la corriente de reflujo de diesel (reflujo intermedio de la fraccionadora V-3).

Luego, el crudo va a la torre pre-flash V-1 donde se vaporiza un 4% de la carga aproximadamente, enviándose los vapores producidos al plato 5 de la torre de fraccionamiento V-3, mientras que la fase líquida es retirada por el fondo del tambor (crudo). Este crudo es descargado a través del resto de intercambiadores que conforman el tren de precalentamiento mediante las bombas P-2/2A, específicamente pasa por los intercambiadores de calor E-7B/7A (lado tubo), para retirar calor de la corriente de reflujo de diesel (reflujo intermedio de la fraccionadora V-3), luego el crudo absorbe calor en el intercambiador E-10B/10A (lado casco), de la corriente de residual de la fraccionadora V-3.

Finalmente este crudo precalentado es enviado al horno vertical H-1 de donde sale parcialmente vaporizado a una temperatura de transferencia entre 600-615 °F, dependiendo de la alimentación de la planta.

El crudo ya caliente entra a la zona de expansión de la torre fraccionadora V-3 por el plato 23, en donde el crudo vaporizado asciende a través de la columna, mientras que la parte líquida desciende al fondo. Los vapores que salen del tope de la fraccionadora V-3 se ramifican en tres partes de manera de condensar estos por separado y paralelamente, realizándose dicha operación se en los condensadores de tope E-12F/C/D, E-12E/A/B y E-11A/B, en donde el medio refrigerante es agua de mar. El condensado de tope es enviado al tambor acumulador V-7 de donde se separa por diferencia de densidad, gas de proceso, gasolina no estabilizada y agua. El gas del proceso es enviado al quemador, la gasolina no estabilizada es succionada por la P-101/101A para enviar, parte de ella a la torre estabilizadora de gasolina T-101 y la otra parte como reflujo al tambor acumulador V-7 para mantener el nivel de líquido, mientras que el agua es enviada a drenaje.

A diferencia de otras torres de destilación, la torre fraccionadora V-3 no posee reflujo convencional de productos de tope provenientes del acumulador V-7. El reflujo de tope que extrae líquido del plato N° 3, succionado por la bomba P-5/P-6A se enfría con el crudo de la planta en los intercambiadores E-1 A/B/C/D/E y luego con agua de mar en los enfriadores E-2 A/B, regresando al plato 1 de la torre V-3.

A la altura del plato 10 se extrae hacia el despojador V-5 la corriente de querosén o diesel liviano para ser despojado con vapor de 180 psig, el cual es inyectado por la parte inferior del despojador.

El vapor junto con las fracciones livianas salen por el tope del despojador vía fraccionadora V-3 a la altura del plato 8, mientras que por el fondo sale el querosén despojado, el cual es succionado por la bomba P-8/P-7A para luego ser llevado lado casco por los intercambiadores de calor E-3A/B y así calentar la corriente de crudo de la planta; seguidamente la corriente de querosén pasa a los enfriadores E-4/E-5 respectivamente, cuyo medio de enfriamiento es agua de mar para luego ser llevado a almacenaje (los tanques de almacenaje de diesel y/o querosén son: 20x8, 20x9, 150x9).

A la altura del plato 14 se extrae la corriente de diesel pesado, de la cual, una parte es retornada como reflujo intermedio y la otra es enviada al despojador de diesel V-4 el cual utiliza vapor de 180 psig; luego este vapor junto con las fracciones livianas salen por el tope del despojador y es retornado al fraccionador V-3 por el plato 12, mientras que por el fondo sale la corriente de diesel que es succionada por las bombas P-7/7A y llevada a través del intercambiador E-8 donde precalienta el crudo que está ingresando a la planta; seguidamente pasa por los enfriadores E-9A/B cuyo medio de enfriamiento también es agua de mar, para luego ser llevado a almacenaje.

Por otra parte, la corriente de reflujo intermedio es llevada mediante las bombas P-6/6A a través de los intercambiadores de calor E-7A/B (lado casco) para precalentar el crudo (lado tubo). En la salida del intercambiador E-7B, la corriente de reflujo de diesel es enfriada en los intercambiadores E-6A/B (lado casco) cumpliendo la misma función nombrada anteriormente. Posteriormente se une la corriente de salida de diesel de los intercambiadores E-6B y E-7B para finalmente retornar como reflujo intermedio a la fraccionadora V-3 a la altura del plato 11.

Por el fondo de la torre fraccionadora V-3 se extrae el residual, el cual es succionado por medio de las bombas P-9/P-9 A/P-9B y llevado a través de los intercambiadores E-10A/10B respectivamente (lado tubo), seguidamente pasa por los intercambiadores E-17 (lado casco) y E-18 (lado tubo) para precalentar el crudo. Posteriormente, pasa por el intercambiador E-102 (lado tubo) donde precalienta la nafta secundaria que va a la torre T-101, luego es enviado a la caja de enfriamiento para finalmente ser llevado a almacenaje (tanques: 150x6, 150x7, 150x10, 150x11).

En la torre estabilizadora de gasolina T-101, la gasolina secundaria proveniente del tambor acumulador de gasolina V-7, es despojada de sus componentes más livianos (GLP) con la finalidad de convertirla en una gasolina más pesada y de mayor punto inicial de ebullición (mejorar en un 90%). Para realizar este proceso, la gasolina secundaria es succionada por la bomba P-101 y llevada a través del intercambiador E-101 (lado casco) donde se precalienta con la gasolina estabilizada que sale del fondo de la torre T-101, luego pasa (lado casco) por el intercambiador de calor E-102 donde se precalienta con la corriente de residual obtenida de la fraccionadora V-3 y así entrar al plato 17 de la torre estabilizadora de gasolina.

Los gases que salen del tope de la torre estabilizadora de gasolina son condensados en el intercambiador E-104 A/B. El condensado es enviado al tambor acumulador V-101 en donde se separa el gas de proceso, agua y gasolina estabilizada. El gas de proceso es enviado al tambor V-2 en donde es mezclado con gas natural para ser utilizado como gas combustible en el horno H-1, donde el crudo es calentado hasta la temperatura de transferencia requerida para entrar a la torre de fraccionamiento V-3.

La gasolina condensada del tambor V-101, es succionada por las bombas P-103/103A y llevada como reflujo de tope a la altura del plato 30 de la torre estabilizadora T-101 (siendo enumerados de abajo hacia arriba). Debido a la poca producción de agua, la válvula que envía ésta al drenaje se mantiene cerrada.

Desde el plato 1 de la torre estabilizadora T-101, se extrae una corriente de gasolina pesada el cual pasa a través del rehervidor E-103, en donde se vaporiza la gasolina con un vapor de 180 psig para posteriormente ser retornada por la parte inferior de la torre T-101. Por el fondo se extrae la corriente de gasolina estabilizada, la cual es enfriada en el intercambiador de calor E-101 (lado tubo) por la corriente de gasolina no estabilizada. Luego pasa por el enfriador E-105 donde se enfría con agua de mar y finalmente la corriente de gasolina estabilizada es succionada por la bomba P-102/P-102A para ser llevada a almacenaje (tanques: 80x35 al 80x41) (Moreno y Ramírez, 2001).

2.3 Análisis cuantitativo de riesgos

El análisis cuantitativo de riesgos (ACR) consiste en la evaluación sistemática de una instalación industrial propuesta o existente, con el fin de identificar todo evento potencialmente peligroso y estimar los daños al personal, instalaciones, terceros y el ambiente, como consecuencias de fugas de sustancias tóxicas e inflamables, y así poder cuantificar el nivel de riesgo implícito mediante la estimación de la frecuencia de ocurrencia y la magnitud de sus consecuencias. El propósito principal del análisis cuantitativo de riesgos es jerarquizar los eventos no deseados y por ende, derivar criterios de juicio que permitan tomar decisiones gerenciales que conlleven al incremento de los niveles de seguridad de la instalación.

Esta metodología no establece preconcepciones acerca de la credibilidad de cualquier accidente de hecho, cualquier peligro o escenario de accidente que puede ser identificado es considerado para análisis, incluyendo error humano, fallas de los sistemas de protección y eventos fortuitos como caída de aviones. Una fortaleza particular del análisis cuantitativo de riesgos, es que siendo cuantitativo en su naturaleza, provee una visión óptima de los riesgos asociados con una actividad particular, a diferencia de cualquier generalización cualitativa o subjetiva. Provee por lo tanto una mejor comprensión del sistema bajo estudio y sus debilidades potenciales pueden conducir a la identificación de posibles modificaciones que reduzcan significativamente el riesgo total (Zambrano, 2007).

2.4 Identificación de peligros

Es la identificación de fuentes de accidentes significativos y las formas en que podrían ocurrir, inherentes al proceso y/o instalación.

La identificación de peligros es un paso crítico en el análisis cuantitativo de riesgos, por cuanto un peligro omitido es un peligro no analizado. Existen varios métodos desarrollados mundialmente para la identificación de peligros potenciales. Algunos de los métodos son: análisis preliminar de peligros, estudio de peligros y operabilidad (HAZOP), evaluación técnica de seguridad industrial, método ¿qué pasaría si? y análisis por el modo de falla y sus efectos (Zambrano, 2007).

2.5 Análisis de consecuencias

La estimación de consecuencias es el término empleado al uso de una serie de modelos matemáticos para estimar el área afectada por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes. (Zambrano, 2007).

A continuación se presentan cada uno de las etapas que hay que desarrollar para obtener las consecuencias.

2.5.1 Escenarios

Un análisis cuantitativo de riesgos completo debe explorar todos los eventos peligrosos posibles que puedan ocurrir en la instalación bajo estudio. Típicamente los escenarios incluidos en un análisis de consecuencias de una instalación que procese hidrocarburos son: fugas de fluidos tóxicos y/o inflamables/combustibles de equipos de proceso, tuberías y tanques de almacenamiento, incendios que envuelven fugas de productos inflamables, explosiones de nubes de vapor y ocurrencia de bola de fuego (BLEVE) en recipientes de proceso presurizados conteniendo gases licuados inflamables.

Los eventos descritos anteriormente van a producir uno o más peligros, por lo que son considerados eventos peligrosos, para los cuales, los que resultan de interés para plantas de procesamiento de hidrocarburos y petroquímicas, pueden ser clasificados como se muestra a continuación:

- ❖ Cualquier falla de un equipo que pueda resultar en la liberación accidental a la atmósfera de un fluido tóxico o inflamable.
- ❖ Cualquier error humano que resulte en la liberación a la atmósfera de un fluido tóxico o inflamable.

- ❖ Cualquier falla de equipo que produzca una onda de choque o sobrepresión.
- ❖ Cualquier ignición de un fluido liberado o acumulación de líquido que esté presente como resultado de la operación normal de la planta.

Dentro de estas categorías, existen gran variedad de eventos, los cuales tienen una probabilidad diferente de ocurrir, y a su vez, diferentes consecuencias. Dentro de los eventos implícitos, que comprendan cualquier falla de un equipo que pueda resultar en la liberación accidental a la atmósfera de un fluido tóxico o inflamable, se encuentran los siguientes:

- ❖ Falla de la tubería.
- ❖ Falla por el sello de una bomba.
- ❖ Falla en el sello de un compresor.
- ❖ Falla abierta de un dispositivo de alivio de presión.
- ❖ Falla de un recipiente.
- ❖ Mechurrio de quema apagado.
- ❖ Falla en empaadura.
- ❖ Fuga por eje de válvula.
- ❖ Falla en cuerpo de: válvula, bomba, filtro, entre otros. (Zambrano, 2007)

2.5.2 Selección de los tamaños de orificios de fugas

Debido a la fuerte influencia de los diámetros de orificios de fuga en los resultados de las consecuencias finales, es recomendable establecer tamaño de agujeros que representen casos o fugas menores, medianas y mayores, donde el rango de tamaños permita evaluar las consecuencias dentro y fuera de los límites de la planta.

Debido a la infinidad de diámetros de tuberías y equipos existentes en una instalación, es fácil intuir que existen infinitas combinaciones de diámetros de tuberías con relación al diámetro equivalente de orificios de fugas. Evaluar cada caso requeriría de gran cantidad de ejercicios de cálculo. Por esto se hace necesario hacer una simplificación que permita llegar a un resultado con la suficiente exactitud como para poder tener una herramienta clara para tomar decisiones.

Normalmente las consecuencias de los escenarios evaluados pueden afectar a personas y equipos dentro o fuera del límite de propiedad de la instalación. Para afectación dentro de los límites de propiedad, los tamaños de agujeros pequeños y medianos usualmente dominan el riesgo, debido a que son de mayor probabilidad de ocurrencia, y para efectos fuera del límite de batería, tamaños de agujeros medianos y mayores dominarán las severidades mayores. (Zambrano, 2007)

2.5.3 Criterios de daños

Para obtener resultados significativos al usar el método de ACR, es imperativo evaluar las consecuencias. Para llevar a cabo tal evaluación se establecen criterios de daños referidos a efectos de productos tóxicos, incendios y explosiones generadas por los posibles escenarios de accidentes.

Un método para evaluar las consecuencias producto de un accidente es el modelo de efecto directo el cual predice efectos sobre personas o estructuras basadas en criterios predeterminados. Para estimar riesgos se debe usar una unidad común de medida de consecuencias para cada tipo de efectos (muerte, lesión o pérdidas económicas). La imposibilidad de

comparar diferentes tipos de efectos ha llevado al uso de las fatalidades (pérdidas humanas) como el criterio de comparación predominante. (Zambrano, 2007)

2.5.4 Ecuaciones PROBIT

Las ecuaciones PROBIT fueron originalmente desarrolladas para mostrar la proporción de especímenes de pruebas en laboratorios que morirían debido a dosis diversas de biocida. Su uso en personas está basado en la extrapolación de datos experimentales de respuestas a diferentes dosis y evaluación de diferentes accidentes ocurridos en el pasado que permiten cuantificar la tasa de fatalidades esperada para una población promedio expuesta al peligro.

Estas ecuaciones suponen que todos los individuos tienen iguales posibilidades de ser totalmente afectados debido a una dosis particular y que esta probabilidad es igual a la proporción de muertes en una población grande expuesta (Arias, 2004).

2.5.5 Modelos matemáticos para la estimación de consecuencias

Los modelos de estimación de consecuencias presentados a continuación, están definidos por un determinado rango de aplicación y presentan algunas limitaciones.

a. Escape de un gas por un orificio

La descarga de un gas o vapor sometido a presión se calcula normalmente utilizando ecuaciones estándares para flujo de gas. La cantidad

de fluido que se fuga por un orificio cualquiera va a depender del régimen de flujo, del área de la fuga y de la condición termodinámica y química del gas. Las ecuaciones para el modelaje de este tipo de fuga son las planteadas por Crowl y Louvar (1990):

Existen dos regímenes de flujo, flujo subsónico y supersónico. La transición de un régimen a otro ocurre a una relación de presiones determinadas por:

$$r_{crit} = \frac{P_0}{P_{ext}} = \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Donde:

P_0 = presión absoluta del recipiente (Pa)

P_{ext} = presión atmosférica (Pa)

K = relación de calores específicos del gas (C_p/C_v)

Para valores de $P_0 < P_{ext} \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\left[\left(\frac{2g_c MK}{R_g T_0 (K-1)} \right) \left[\left(\frac{P_{ext}}{P_0} \right)^{\frac{k}{2}} - \left(\frac{P_{ext}}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right]} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Para valores de $P_0 > P_{ext} \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\left(\frac{K g_c M}{R_g T_0} \right) \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (\text{Ec.2.3})$$

Donde:

Q_m = tasa de flujo (kg/s)

C_0 = coeficiente de descarga (adimensional)

A = área del orificio (m^2)

P_0 = presión absoluta en la fuente (Pa)

g_c = constante gravitacional ($1(\text{kg m/s}^2)/\text{N}$)

M = peso molecular (kg/kmol)

R_g = constante de los gases ideales (8,314 J/mol K)

T_0 = temperatura de la fuente (K)

El coeficiente de descarga C_0 es el resultado de una función del número de Reynolds, del tipo de gas que se fuga por un orificio y del diámetro del agujero. Normalmente se encuentra entre 0,7 y 0,9. (Zambrano, 2007)

b. Escape de líquidos

Si en vez de escapar gas a la atmósfera, se produce una fuga de líquido, la tasa de descarga va a depender principalmente de la velocidad y área de fuga.

- **Escape de líquido por orificios**

Según, Crowl y Louvar (1990), la tasa de flujo es:

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho g_c P_g} \quad (\text{Ec.2.4})$$

Donde:

Q_m = tasa de flujo (kg/s)

C_0 = coeficiente de descarga (adimensional)

A = área de fuga (m^2)

P_g = presión manométrica (Pa)

g_c = constante gravitacional ($1(\text{kg m/s}^2)/\text{N}$)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

El coeficiente de descarga C_0 es el resultado de una función del número de Reynolds, del tipo de líquido que se fuga por un orificio y del diámetro del agujero. Normalmente se encuentra entre 0,6 y 0,8. (Zambrano, 2007)

- **Escape de líquidos por agujeros en tanques**

La tasa de flujo a través del orificio en un instante t se puede calcular mediante la ecuación de Crowl y Louvar, (1990).

$$Q_m = \rho AC_0 \sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g_c h_L \right)} - \frac{\rho g_c C_0^2 A^2}{A_t} t \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde:

Q_m = tasa de flujo (kg/s)

C_0 = coeficiente de descarga (adimensional)

A = área del orificio (m^2)

P_g = presión manométrica sobre la superficie del líquido (Pa)

g_c = constante gravitacional (1(kg m/s²)/N)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

h_0 = altura del líquido inicial (m)

t = tiempo (s)

A_r = área sección transversal del recipiente (m²)

Si el líquido es transportado o almacenado a presión sobre su punto de ebullición, la fuga resultará en una corriente de líquido que parcialmente se evaporará instantáneamente, o que parcialmente formará pequeñas gotas en forma de aerosol que serán transportadas por el viento.

Entonces, la fracción de líquido evaporada instantáneamente vendrá dada por la ecuación de Crowl y Louvar (1990):

$$F_{vap} = \frac{C_p(T_0 - T_b)}{\Delta H_v} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Donde:

C_p = capacidad calorífica del líquido (J/kg K)

F_{vap} = fracción de líquido evaporada (adimensional)

T_0 = temperatura de líquido (K)

T_b = temperatura de ebullición del líquido (K)

ΔH_v = calor latente de vaporización (J/kg)

Si $F_{vap} > 1$, el líquido se evapora totalmente antes de alcanzar la presión atmosférica, es decir, antes de que el escape salga al ambiente exterior. En este caso, se deberá calcular la temperatura y presión de vapor

correspondientes, y aplicar las formulas de cálculo para escapes de gases, o vapores bajo la diferencia de presión remanente.

Si $F_{VAP} < 1$, entonces parte del líquido se evapora instantáneamente al salir de la atmósfera.

En cambio, si se produce el derrame del líquido sin evaporarse instantáneamente, se formará una piscina que más tarde tendrá una tasa de evaporación de líquido que vendrá dada por las condiciones termodinámicas del líquido, por los calores absorbidos por el líquido de los alrededores y por las condiciones atmosféricas (velocidad del viento y estabilidad atmosférica).

El área de la piscina o extensión del derrame, para fugas continuas puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$A_p = \frac{Vt}{h_m} \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde:

A_p = área de la piscina (m^2)

V = flujo volumétrico (m^3/s)

t = tiempo (s)

h_m = profundidad de la piscina, donde para concreto se aproxima a 5×10^{-3} m, y para grava a 10×10^{-3} m

La tasa de vaporización para líquidos volátiles, vendrá dada por (AIChE/CCPS, 1987):

$$Q = Ku\rho \frac{P_v}{P_a} = \left(\frac{2}{u^2 D_p} \right)^{n_c} \quad (\text{Ec.2.8})$$

Donde:

Q= tasa de vaporización (kg/s)

K= constante (adimensional)

P_a= presión atmosférica (bar)

P_v= presión de vapor del líquido (kN/m²)

D_p= diámetro de la piscina (m)

n_c= índice de vaporización (adimensional)

u= velocidad del viento (m/s)

ρ= densidad del vapor (kg/m³)

La constante K es función del viento y estabilidad. En términos de las categorías de estabilidad Pasquill para unidades en el sistema métrico, se tienen tabulados en la tabla 2.1, los valores que deben de ser sustituidos en la ecuación 2.8.

Tabla 2.1 Valores del índice de vaporización (Zambrano, 2007)

Estabilidad Pasquill	n _c	K	Descripción típica
A	0,078	1,0 x 10 ⁻³	Clima muy soleado
B	0,091	1,2 x 10 ⁻³	Soleado y caluroso
C	0,111	1,5 x 10 ⁻³	Parcialmente nublado en el día
D	0,131	1,7 x 10 ⁻³	Nublado día y noche
E	0,149	1,8 x 10 ⁻³	Parcialmente nublado en la noche
F	0,181	1,0 x 10 ⁻³	Noche clara

Si el producto liberado es inflamable y se produce una ignición, se origina un incendio. Los modelos empleados para calcular los niveles de

radiación térmica emitidos por el incendio, van a depender de la manera como se presentan estos, ya sea en forma de piscinas incendiadas, de chorros incendiados o en forma de fognazos. (Zambrano, 2007)

c. Descarga de flujo de dos fases

Una descarga de flujo de dos fases se presenta cuando un líquido presurizado a una temperatura superior a su punto de ebullición normal, es liberado a presión atmosférica. El líquido empezara a evaporarse dando como resultado un flujo de dos fases. El flujo de dos fases también ocurre como producto de la despresurización del espacio de vapor encima de un líquido volátil, especialmente si el líquido es viscoso (mayor que 500 cP) o tiene una tendencia a formar espuma.

Los flujos de dos fases son clasificados como reactivos o no reactivos. El caso reactivo es típico de alivios de emergencia de reacciones exotérmicas. El caso no reactivo involucra la evaporación de líquidos cuando estos son descargados del medio que los contiene. Para esto se requieren dos consideraciones especiales:

- ❖ Si el líquido es subenfriado, el flujo alcanzará su mayor tasa de descarga a su presión de vapor de saturación a temperatura ambiente.
- ❖ Si el líquido es almacenado por debajo de su propia presión de vapor.

Las dos situaciones son consideradas por la siguiente expresión (Fauske y Epstein, 1987)

$$m = A \sqrt{G_{SUB}^2 + \frac{G_{ERM}^2}{N}} \quad (\text{Ec.2.9})$$

Donde:

m = descarga de un líquido saturado o subenfriado (kg/s)

A = área de la descarga (m^2)

G_{SUB} = flujo subenfriado ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

G_{ERM} = flujo en equilibrio ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

N = parámetro de desequilibrio (adimensional)

Las propiedades son evaluadas a temperatura y presión de almacenamiento. El flujo másico de líquido subenfriado viene expresado por:

$$G_{SUB} = C_0 \sqrt{2\rho_f g_c (P - P_{sat})} \quad (\text{Ec.2.10})$$

Donde:

C_0 = coeficiente de descarga (adimensional)

ρ_f = densidad del líquido (kg/m^3)

g_c = constante gravitacional ($1(\text{kg m}/\text{s}^2)/\text{N}$)

P = presión de almacenamiento (Pa)

P_{sat} = presión de saturación del líquido a temperatura ambiente (Pa)

Para líquidos saturados, el equilibrio es alcanzado si el tamaño de la tubería que presenta la fuga es mayor que 0,1 m y el lugar donde se encuentra el orificio esta a una longitud mayor que 10 diámetros con respecto al tanque. La tasa de descarga viene dada por (Crowl y Louvar, 1990):

$$G_{ERN} = \frac{h_{fg}}{v_{fg} \sqrt{T C_p}} \sqrt{\frac{g_c}{g}}$$

(Ec.2.11)

Donde:

h_{fg} = entalpía de vaporización (J/kg)

v_{fg} = volumen específico entre el líquido y vapor (m³/kg)

T= temperatura de almacenamiento (K)

C_p = capacidad calorífica del líquido (J/kgK)

El parámetro de desequilibrio N, cuantifica el efecto de la distancia, y viene expresado por la ecuación (Fauske and Epstein, 1987):

$$N = \frac{h_{fg}^2}{2\Delta P \rho_f C_p^2 v_{fg}^2 T C_p} + \frac{L}{L_c}$$

(Ec.2.12)

Donde:

N= parámetro de desequilibrio (adimensional)

ΔP = diferencia total de presión disponible (Pa)

L= longitud de la tubería (m)

L_c = distancia para condiciones de equilibrio (usualmente 0,1 m)

d. Evaporación violenta (flash) y evaporación

El propósito de los modelos de evaporación violenta (flash) y evaporación es estimar la fracción de líquido que se vaporiza para formar una nube, para luego utilizarla como entrada en los modelos de dispersión. Los líquidos sobrecalentados se evaporan súbitamente al escapar a la

atmósfera. El vapor producido puede contener una cantidad de líquido en forma de gotas, una parte de este líquido puede caer a la superficie como rocío, y otra parte puede permanecer suspendida como aerosol.

El líquido remanente en ebullición forma una piscina la cual continuará evaporándose, añadiendo vapor adicional al aire. Una descarga de propano líquido, constituye un ejemplo de una fuga de un líquido sobrecalentado, desde un recipiente presurizado a temperatura ambiente. En la figura 2.2, se muestra el comportamiento de los líquidos al liberarse a la atmósfera.

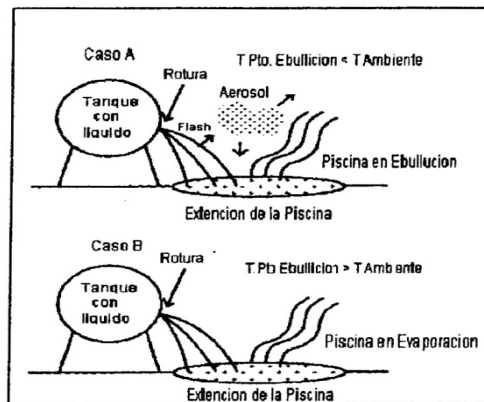


Figura 2.2. Comportamiento de los líquidos al liberarse a la atmósfera (Zambrano, 2007)

La fracción de líquido evaporado en los escapes de líquidos sobrecalentados puros puede ser obtenida con los diagramas de Mollier (entalpía – presión). A continuación se presenta la ecuación estándar para la evaporación de líquidos sobrecalentados:

$$F_V = Cp \frac{(T - T_b)}{h_{fg}} \quad (\text{Ec.2.13})$$

Donde:

C_p = capacidad calorífica promedio entre T y T_b (J/kg K)

T= temperatura inicial del líquido (K)

T_b = punto de ebullición atmosférico del líquido (K)

H_{fg} = calor latente de vaporización del líquido a T_b (J/kg)

F_v = fracción de líquido evaporado del escape (adimensional)

Las cantidades significativas de vapor se forman sólo si el punto de ebullición del líquido derramado está por debajo de la temperatura ambiente. Los líquidos refrigerados al escapar y caer sobre la superficie circundante, producen al principio una gran evaporación, que luego va disminuyendo debido al enfriamiento de esta superficie.

Los líquidos volátiles, al escapar, pueden formar una emisión considerable de gas debido a la evaporación superficial de la piscina resultante. La evaporación de una piscina es determinada por medio de un balance global de energía en la misma:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = H - L\dot{m} \quad (\text{Ec.2.14})$$

Donde:

m= masa de la piscina (kg)

C_p = calor específico del líquido (J/kg K)

T= temperatura del líquido en la piscina (K)

t= tiempo (s)

H= flujo de calor a la piscina (J/s)

L= calor de vaporización del líquido (J/kg)

\dot{m} = tasa de evaporación (kg/s)

Para efectos de modelar la evaporación, los líquidos pueden ser clasificados como de alta y baja volatilidad, donde los de alta volatilidad son aquellos que tienen un punto de ebullición similar o menor a la temperatura ambiente o del terreno, y en donde la tasa de evaporación es controlada por la transferencia de calor por conducción del suelo, por la transferencia de calor por conducción y convección del aire, por la radiación del sol y por otras fuentes de calor circundantes tales como un incendio o mechurrio. Para líquidos con alta volatilidad, la ecuación 2.14 puede ser simplificada si se supone estado continuo, de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \frac{H}{L}$$

(Ec.2.15)

Donde:

H= flujo de calor a la piscina (J/s)

L= calor de vaporización del líquido (J/kg)

\dot{m} = tasa de evaporación (kg/s)

e. Piscina incendiada

Un incendio de un derrame, puede originarse de distintas formas. Típicamente comienza con la descarga de un material inflamable proveniente de un equipo de proceso. Si el material está en fase líquida, almacenado a una temperatura inferior a su punto de ebullición, el líquido formará una piscina cuya geometría estará determinada por los obstáculos existentes en los alrededores, o se esparcirá libremente. (anexo A)

El efecto primario de este tipo de incendio es la radiación térmica, por lo que los aspectos tales como el espaciamiento entre tanques, plantas,

revestimiento contra incendio y necesidad de barreras contra fuego entre otras, deben ser considerados basados en análisis de consecuencias específicos según el rango posible de este tipo de incendio.

La determinación de los efectos térmicos dependerá del tipo de combustible, la geometría de la piscina, la duración del incendio, la ubicación del receptor de la radiación con respecto al incendio y el comportamiento de este receptor ante la radiación, entre otros. Los modelos que calculan los efectos térmicos utilizan distintos submodelos interconectados entre sí, los cuales son empíricos, sin embargo, este tipo de incendio ha sido estudiado durante años lo que ha permitido su validación. Algunos de ellos son planteados a continuación:

- **Tasa de quemado**

La tasa de quemado permite conocer el calor irradiado por unidad de área y estimar la duración del incendio. Para diámetros de piscinas mayores a 1 m, la transferencia de calor por radiación domina y el factor geométrico de visión con respecto a la llama es constante, por lo que se puede esperar que la tasa de quemado no varíe, permitiendo calcularla con facilidad. Entonces, la velocidad de disminución de nivel de una piscina incendiada está dada por:

$$Y_{mac} = 1,27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H} \quad (\text{Ec.2.16})$$

Donde:

Y_{max} = velocidad de disminución vertical del nivel del líquido (m/s)

ΔH_c = calor neto de combustión (J/kg)

$\Delta\ddot{H}$ = calor de vaporización modificado, en el T_b líquido (J/kg)

El calor de evaporación modificado incluye el calor de evaporación y un ajuste para calentar el líquido desde la temperatura ambiental hasta la de su punto de ebullición. Este valor es calculado mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta\ddot{H} = \Delta H_v + \int_{T_a}^{TBP} C_p dT \quad (\text{Ec.2.17})$$

Donde:

ΔH_v = calor de evaporación del líquido a T ambiente (J/kg)

C_p = calor específico del líquido (J/kg K)

T_a = temperatura ambiente (K)

TBP = temperatura del punto de ebullición (K)

La tasa de quemado de combustible (masa) es calculada multiplicando la tasa de quemado vertical por la densidad del líquido. Si se desconoce el valor de la densidad, la tasa de quemado de combustible (masa) puede ser aproximada utilizando la siguiente ecuación:

$$m_B = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta\ddot{H}} \quad (\text{Ec.2.18})$$

Donde:

m_B = tasa de quemado (masa) de combustible (kg/m^2)

ΔH_c = calor neto de combustión (J/kg)

$\Delta\ddot{H}$ = calor de vaporización modificado, en el T_b líquido (J/kg)

- **Tamaño de la Piscina**

En la mayoría de los casos, el tamaño de la piscina es determinado por la magnitud de la fuga y los obstáculos físicos presentes en los alrededores (diques, áreas de drenaje con pendiente). Para una fuga continua sobre una superficie plana sin restricciones, el diámetro máximo de la piscina es alcanzado cuando la tasa de quemado (masa) de combustible iguala a la tasa de fuga de este. Este diámetro puede ser calculado mediante:

$$D_{MAX} = 2\sqrt{\frac{V_L}{\pi y}} \quad (\text{Ec.2.19})$$

Donde:

D_{MAX} = diámetro de equilibrio de la piscina (m)

V_L = tasa volumétrica de derrame de líquido (m^3/s)

y = velocidad de quemado del líquido (m/s)

- **Geometría de las llamas**

-

- ❖ **Altura de la llama.** Muchas observaciones de piscinas incendiadas muestran que hay una relación aproximada de la altura de la llama con respecto al diámetro de la piscina. La mejor correlación para calcular esa relación viene dada por Thomas (1963) para piscinas circulares.

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61} \quad (\text{Ec.2.20})$$

Donde:

H = altura visible de la flama (m)

D = diámetro equivalente de la piscina (m)

m_B = tasa de combustión ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ρ_a = densidad del aire ($1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ a 20°C y 1 atm)

g = aceleración debida a la gravedad ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

- ❖ **Inclinación de la llama.** Las piscinas incendiadas son frecuentemente afectadas por el viento y la llama puede ser desplazada vientos abajo. La inclinación de la llama se calcula mediante la siguiente correlación:

$$\cos(\theta) = 1, \text{ para } i \leq 1 \quad (\text{Ec.2.21})$$

$$\cos(\theta) = (i)^{-2.5}, \text{ para } i > 1 \quad (\text{Ec.2.22})$$

$$i = u \left(\frac{g v D}{\rho_v} \right) \quad (\text{Ec.2.23})$$

Donde:

θ = Ángulo de inclinación respecto a a la vertical ($^\circ$)

u = Velocidad del viento (m/s)

D = Diámetro de la piscina (m)

v = Velocidad de quemado ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ρ_v = Densidad de vapor de combustible (kg/m^3)

- **Flujo de calor**

El calor total irradiado en el incendio de un líquido viene expresado por (NFPA, 1986):

$$Q = f A v H_c \quad (\text{Ec.2.24})$$

Donde:

Q = calor total irradiado (J/s)

f = fracción de calor de combustión emitido por radiación (adm)

A = área de la superficie incendiada (m^2)

v = velocidad de quemado del líquido (kg/m^2s)

H_C = calor de combustión del líquido (kJ/kg)

El factor f depende del tipo de combustible. La velocidad de quemado de un líquido, es un valor que depende de variables tales como: naturaleza del líquido, tiempo de quemado, espesor de la capa de líquido, velocidad del viento, etc. El valor del calor de combustión del líquido, dependerá del combustible evaluado.

- **Intensidad de radiación.**

Existen dos modelos ampliamente utilizados para el cálculo de intensidad de radiación debido a incendios en piscinas. Uno es el modelo de foco puntual de radiación y el otro es el modelo de factor geométrico de visión.

- Modelo de foco puntual

El modelo de foco puntual se basa en el supuesto de que todo el calor irradiado por el incendio proviene de una pequeña fuente de energía térmica, ubicada en el centro de la llama, y resulta adecuado para aquellos casos en que se estime la radiación a distancias 4 veces mayores al diámetro de la superficie incendiada. La ecuación para el cálculo de la intensidad de radiación viene dada por:

$$I = \frac{Q}{4\pi R^2} \cos(\theta) \quad (\text{Ec.2.25})$$

Donde:

I= intensidad de radiación térmica (KW/m²)

Q= calor total irradiado (KW)

R= distancia al foco de radiación (m)

Θ = ángulo de incidencia (°)

➤ Factor geométrico de visión

El método de visión aproxima la geometría de la llama a la de un cilindro y se fundamenta en que la radiación térmica sobre un objeto que no se encuentra en contacto directo con la llama no es la que emite la llama en su totalidad, sino una parte de ella. Esta porción de energía que recibe el objeto esta influenciada por el factor de visión, el cual es un factor geométrico que depende del radio, altura y ángulo de inclinación de la llama.

Este modelo permite evaluar intensidades de radiación sobre elementos ubicados a cortas y largas distancias desde la fuente de ignición. La intensidad de radiación térmica incidente sobre una superficie vertical, ubicada a la misma altura que la base de las llamas viene expresada por:

$$I = F \frac{Q}{Hd} \quad (\text{Ec.2.26})$$

Donde:

I= intensidad de radiación térmica (kW/m²)

Q= calor total liberado por radiación (kW)

H= altura de la llama (m)

F= factor de visión (adimensional)

d = diámetro de la piscina (m)

Si el líquido que está almacenado a una presión superior a la de su punto de ebullición, cuando este escapa a la atmósfera, una fracción se evaporara súbitamente mientras que el líquido remanente formará una piscina en las cercanías del lugar de fuga. Los vapores que se originan en esta piscina requieren de una fuente de ignición, que pudiera existir y entrar en contacto con la nube generada, a medida que es arrastrada por el viento. Las llamas viajarían a través de la nube hasta el lugar de la fuga, incendiando el material aun en fase líquida.

Si el líquido está almacenado a una presión inferior a la de su punto de ebullición, la ignición del derrame puede ocurrir a través de los vapores inflamables que expide el líquido. Ambos casos resultan en un fogonazo inicial debido a los vapores que arden desde la fuente de ignición hasta el lugar del derrame, donde se origina lo que se conoce como piscina incendiada. Si la descarga de material continúa, es probable que también ocurra un chorro incendiado. Si la ignición sucede justo cuando comienza el derrame, no hay tiempo suficiente para que se forme una piscina y solamente ocurrirá un chorro incendiado. (Zambrano, 2007)

f. Chorro de fuego

Un chorro de fuego normalmente resulta de la combustión de un material a medida que escapa a presión de una unidad de proceso o almacenamiento. Al igual que para las piscinas incendiadas, el mayor punto de preocupación esta en los efectos locales debido a la radiación. (anexo A)

Uno de los modelos es el desarrollado por el instituto Americano del Petróleo (API), el cual considera que la longitud de la llama es

aproximadamente la de un chorro no incendiado que está bajo la forma de una serie de fuentes tipo punto, espaciadas a lo largo de la línea central del chorro, con todas las fuentes irradiando cantidades iguales de calor “q”, en donde la intensidad de radiación térmica sobre un objeto cualquiera vendrá dada por el calor irradiado por el chorro, por un factor de emisividad dependiente de la naturaleza del material y por la distancia del organismo receptor a la llama. Este método no es muy exacto cuando se trabaja con chorros a alta presión.

Otro modelo es el propuesto por Considine y Grint, en el cual asumen la geometría de la llama en forma de cono. Esta es una correlación para LPG y viene dada por:

$$L = 9,1m^{0,5} \quad (\text{Ec.2.27})$$

$$W = 0,25L \quad (\text{Ec.2.28})$$

$$r_{s,50} = 1,9t^{0,4}m^{0,47} \quad (\text{Ec.2.29})$$

Donde:

L= longitud de la llama (m)

W= mitad cónica del chorro incendiado en la punta de la llama (m)

m= tasa de descarga de GLP dentro de un rango $1 < m < 3.000$ kg/s (kg/s)

$r_{s,50}$ = rango lateral de peligro a una letalidad del 50%, para $r > W$ (m)

t= tiempo de exposición, para $10 < t < 300$ s (s)

Si por el orificio se está escapando gas y este no se ignita inmediatamente, se dispersará formando una nube. Si esta consigue una

fuente de ignición retardada se puede producir una explosión de nube de vapor (VCE) o un fogonazo. (Zambrano, 2007)

g. Fogonazo

Un fogonazo es la combustión no explosiva de una nube de vapor que resulta de un escape de gas a la atmósfera. Distintos experimentos han demostrado que las nubes de vapor sólo explotan en aquellas áreas donde se desarrolla intensamente un combustión turbulenta, si y solo si ciertas condiciones están presentes. Los peligros mayores derivados de los fogonazos provienen de la radiación y del contacto directo con las llamas. (anexo A)

La duración de un fogonazo normalmente no excede algunas décimas de segundo. Por consiguiente, la radiación total es absorbida por un objeto en las cercanías de un fogonazo es sustancialmente menor que en el caso de una piscina incendiada.

Típicamente, la zona de quemado es estimada ejecutando un modelo de dispersión y definiendo la zona de quemado como el espacio tridimensional comprendido entre el límite inferior de inflamabilidad (LII) y el punto de descarga. (Zambrano, 2007)

h. Explosión de una nube de vapor (VCE)

Una explosión es una descarga violenta y repentina de energía. La violencia de la explosión depende de la tasa a la cual se descarga tal energía. La energía de la explosión de una nube de vapor normalmente se calcula en función del calor de combustión del material. (anexo A)

Para calcular el comportamiento de un VCE, existe un modelo que está basado en datos limitados, recogidos en campo y en las investigaciones de accidentes llamado modelo de Baker-Strehlow, el cual se discute a continuación:

❖ Modelo de Baker-Strehlow

Las curvas utilizadas en el modelo de Baker-Strehlow (figura 2.3) están basadas en modelos numéricos de velocidades constantes de la llama y la aceleración de la llama propagándose a través de una nube de vapor esférica. Con este método, la fuerza de la onda expansiva es proporcional a la máxima velocidad de la llama alcanzada dentro de la nube. Por lo tanto, cada curva en la figura 2.3 está marcada con una velocidad de la llama, la cual es presentada en la forma de número de Mach.

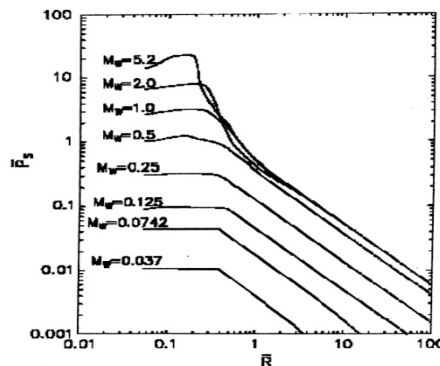


Figura 2.3. Sobrepresión adimensional vs. distancia escalada de la energía de combustión. Modelo Baker - Strehlow (Zambrano, 2007)

Para usar este modelo se desarrollan los siguientes pasos:

- Multiplicar el volumen de la porción de nube de vapor confinada o parcialmente confinada por 3,5 millones de Joules por metro cúbico para determinar la energía total disponible (E).
- Calcular la distancia escalada de la energía de combustión, \bar{R} , para una distancia dada (R) desde el centro de la explosión.

$$\bar{R} = R \left(\frac{P_0}{E} \right)$$

- Seleccionar la velocidad de llama apropiada (número de Mach) para la situación específica que está siendo modelada, basada en los valores listados en la tabla 2.2 [Baker, et al., 1996].
- Encontrar donde la distancia escalada de la energía de combustión, \bar{R} , intercepta con la curva apropiada en la figura 2.3, entonces encontrar el valor correspondiente de sobrepresión adimensional, Ps.
- Multiplicar la sobrepresión adimensional, Ps, por la presión ambiental atmosférica, (P0), para obtener el pico de sobrepresión, \underline{S} , de la onda expansiva a la distancia de interés (R).

Tabla 2.2 Velocidad de la llama en número de mach (M_w) (Zambrano, 2007)

Expansión de la flama	Reactividad del combustible	Densidad de obstáculos		
		Alta	Media	Baja
1D	Alta	5,200	5,200	5,200
	Media	2,270	1,770	1,030
	Baja	2,270	1,030	0,294
2D	Alta	1,770	1,030	0,588
	Media	1,240	0,662	0,118
	Baja	0,662	0,471	0,079
3D	Alta	0,588	0,153	0,071
	Media	0,206	0,100	0,037
	Baja	0,147	0,100	0,037

Baker sugiere que los efectos combinados de la reactividad del combustible, densidad de obstáculos y confinamiento pueden ser relacionados con la velocidad del frente de llama. Esto da como resultado 27 combinaciones posibles de estos parámetros según la expansión de la llama sea en un, dos o tres dimensiones.

La reactividad es clasificada como baja, promedio y alta, siendo el monóxido de carbono y el metano los únicos materiales clasificados como de reactividad baja. El hidrógeno, acetileno, etileno, óxido de etileno y óxido de propileno son considerados como altamente reactivos. Todos los demás combustibles son clasificados como de reactividad media. Las mezclas de distintos combustibles se clasifican según su combustible más reactivo.

La densidad de obstáculos es clasificada como baja, media y alta. La clasificación baja supone pocos obstáculos en el camino de la llama o éstos están bastante separados, existiendo solamente uno o dos niveles de obstáculos. En contraposición, la densidad alta existe cuando hay tres o más niveles de obstáculos con poca distancia entre sí y una relación de obstrucción igual al 40% o superior por nivel. Esta densidad alta puede ocurrir en una unidad de proceso en la cual hay miembros estructurales con poco espaciamiento entre sí, tuberías, válvulas y otros generadores de turbulencia. Puentes de tuberías que tienen varias capas de tuberías con poca separación tienen que ser considerados como ejemplos de alta densidad.

El confinamiento es la base para determinar el tamaño de la nube de vapor, por lo que es necesario contar con lineamientos para determinar la masa del material inflamable. Para descargas pequeñas de material, un enfoque típico consiste en obtener la masa de combustible en el tango de

inflamabilidad mediante el uso de un modelo de dispersión. Sin embargo, este enfoque no es apropiado una vez que la porción inflamable de la nube alcanza un tamaño mayor que el volumen confinado. En este caso, el volumen confinado es el valor utilizado para calcular la cantidad de energía.

Para determinar el volumen confinado, es aconsejable visitar la planta de proceso con el fin de poder identificar los límites razonables para el confinamiento y congestión. La mayoría de las veces, estos límites son obvios puesto que los equipos de proceso son instalados a lo largo y en dirección paralela a un puente de tuberías. Las plantas de proceso exhiben distintos grados de confinamiento según su geometría particular. Las columnas de proceso que se extienden por encima de las áreas confinadas no son normalmente consideradas en los estimados de energía. Como resultado, el límite superior del volumen confinado es usualmente el límite superior de la congestión por encima del área confinada.

El volumen confinado para una unidad de varios niveles en una planta es con mucha frecuencia, el volumen encerrado dentro del marco de acero estructural que sirve de soporte a los equipos, posiblemente exceptuando donde hay equipos instalados sobre el suelo (tales como torres de proceso) adyacentes a la unidad de varios niveles. (Zambrano, 2007)

2.6 Estimación de frecuencias de eventos peligrosos

Cualquier pieza de equipo de procesos (bombas, compresores, válvulas, tanques, recipientes a presión, etc.) puede fallar. Si el equipo que falla contiene materiales peligrosos puede desarrollar una zona de peligro.

El tamaño de la zona de peligro está influenciado por la naturaleza de la falla del equipo. Si se considera la liberación de un fluido peligroso desde una rotura de tuberías de procesos, la falla podría ser una fuga por un orificio producto de una corrosión inducida del metal, una rotura longitudinal debido a una soldadura defectuosa, una rotura de tuberías o cualquiera de las otras posibilidades. Si la fuga ocurre en la unión bridada, podría ser debido a la degradación gradual o pérdida parcial o total del material de la empaadura. En el caso de una falla total de la empaadura o de la tubería, la cantidad de material liberado y la subsiguiente zona de peligro, son fuertemente afectadas por el tamaño y tipo de fuga.

Un método para caracterización de fallas de equipos, es asumir que la falla es la “peor falla posible”, es decir, la falla produce la zona de peligro más grande. Este tipo de falla es frecuentemente llamada la “falla catastrófica” e incluye eventos tales como colapso de un tanque, ruptura de un recipiente de procesos, un BLEVE, etc.

La frecuencia de falla puede ser sintetizada por un análisis de árbol de eventos el cual permite establecer a partir de un evento iniciador, la secuencia de eventos hasta las consecuencias finales, relacionando las fallas de los equipos con el error humano. (AICHE, 1989)

2.7 Cuantificación del riesgo

Las medidas más comunes de cuantificación del riesgo son las llamadas riesgo individual y riesgo social, que combinan la información de posibilidad y magnitud de las pérdidas o lesiones provenientes de un peligro. La medida del riesgo individual considera el riesgo de un ser humano que pueda estar en cualquier punto de la zona de efectos del accidente y la

medida del riesgo social considera el riesgo a las poblaciones que están en tales zonas de efectos.

2.7.1 Riesgo individual

Puede definirse riesgo individual como el riesgo a una persona en la proximidad de un peligro, considerando la naturaleza de la lesión al individuo, la posibilidad de que la misma ocurra y el período de tiempo en que puede ocurrir.

2.7.2 Riesgo social

El riesgo social es una relación entre la frecuencia y el número de personas de una población sometidas a un nivel específico de lesiones y daños debido a la ocurrencia de un accidente. En caso de accidentes mayores con potencial para afectar a grupos de personas, el riesgo social constituye una medida del riesgo a tal grupo de personas y es expresado frecuentemente en términos de distribución de frecuencia de eventos de resultantes múltiples (Arias, 2004).

2.8 Criterios de tolerancia

Decidir si un riesgo es tolerable o no es siempre un tema delicado y subjetivo, que depende en gran parte de la opinión particular de cada persona. Sin embargo, es necesario disponer de criterios de tolerancia de riesgos, puesto que de otra forma no existe medio absoluto para evaluar el significado de los resultados de un análisis cuantitativo de riesgos, ni tampoco de formular recomendaciones adecuadas.

Los criterios de tolerancia de riesgos reflejan el nivel de riesgo tácitamente permisible el cual viene dado por un balance entre la buena práctica de diseño, operación y mantenimiento, y los recursos disponibles para reducir riesgos.

Estos criterios fijan el límite hasta donde se podrá disminuir un riesgo a través de medidas de ingeniería para reducir su frecuencia de ocurrencia y sus consecuencias, el cual lógicamente coincidirá con el límite a partir del cual se deberá invertir en la elaboración de planes de contingencia tendentes a reducir las consecuencias de tales riesgos.

Para poder juzgar la tolerabilidad de un riesgo se fijan tres niveles:

- Riesgo intolerable. En este nivel es inaceptable la condición presente de riesgo y resulta obligatorio la adopción de medidas que reduzcan la frecuencia de ocurrencia y la severidad de los potenciales accidentes.
- Riesgo reducible. Deben evaluarse todas las opciones de reducción del riesgo, a través de la combinación de medidas de ingeniería y/o administrativas, que permitan la disminución de la frecuencia de ocurrencia y/o minimización de consecuencias de los posibles accidentes. En general las medidas deben valorarse mediante la aplicación de un análisis costo-beneficio, que soporte la justificación económica de las propuestas a efectos de facilitar la toma de decisiones.
- Riesgo mínimo. En este caso el riesgo es tolerable y no es imperativo aplicar medidas de reducción del riesgo. No obstante, si se visualizan medidas obvias que contribuyan a reducir aún más el riesgo y la aplicación del análisis costo-beneficio favorece la implantación de tales medidas, las mismas deberían ser adoptadas (Arias, 2004).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 Identificación de los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3

La identificación de peligros fue desarrollada a través de la metodología análisis preliminar de peligros, con la finalidad de definir todos los escenarios peligrosos existentes, utilizando como base los diagramas de flujo de proceso (DFP), diagramas de tubería e instrumentación (DTI), isométricos y balances de masa.

Se procedió a la selección de nodos o subsecciones del sistema en donde la naturaleza de las sustancias envueltas involucrarán a sustancias inflamables, combustibles y tóxicas (crudo, gasolina estabilizada, querosén, diesel pesado, residual y amoniaco) haciendo uso de las hojas de datos de seguridad de materiales (MSDS) y en donde se presentarán variaciones significativas de las condiciones de operación tales como temperatura, presión y/o flujo.

De esta manera se pudo predecir las posibles zonas en donde podrían ocurrir fugas de sustancias ocasionadas por roturas en líneas de proceso, fallas en el sello de una bomba, en el sello de un compresor, fallas en un equipo, en una empacadura, entre otras.

Finalmente, los escenarios seleccionados de los peligros identificados fueron validados durante las diferentes visitas a las instalaciones a fin de conocer el estado actual de las mismas, así como también detectar o verificar situaciones irregulares que pudiesen incrementar el nivel de riesgo en la

unidad DA-3. Los escenarios identificados se muestran en la tabla 4.1 (Identificación de los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3).

3.2 Establecimiento de las consecuencias de los posibles daños ocurridos por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes

Una vez identificados los posibles eventos peligrosos y definidos todos los escenarios que generen eventos no deseados se procedió a estimar el área afectada para cada peligro identificado mediante el programa de simulación Canary By Quest versión 4.3. Dicho programa cuenta con la aceptación de la gerencia corporativa de seguridad industrial de PDVSA para el cálculo de consecuencias en instalaciones de refinación y producción, permitiendo simular la descarga de sustancias inflamables/combustibles y tóxicas (cantidad, tasas, duración), el nivel de radiación, sobrepresión y concentraciones inflamables y/o tóxicas y una estimación de afectación a la integridad física de personas y equipo. En el anexo B se muestran las principales pantallas generadas por el software Canary.

Para realizar las simulaciones se tomaron en cuenta cada una de las siguientes consideraciones:

3.2.1 Variables de proceso

Las variables de proceso tomadas en consideración para el cálculo de consecuencias fueron: presión, temperatura y flujo másico. Esta información se obtuvo a través del manual de información de seguridad de los procesos de la unidad DA-3 (ISP) y por medio del software Aspen Process Explorer.

Las composiciones de las sustancias inflamables y combustibles fueron suministradas por el laboratorio de la refinería Puerto La Cruz.

Esta información a su vez fue validada por la sala de control de la unidad DA-3.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de las variables de proceso para los distintos escenarios considerados.

Tabla 3.1. Variables de proceso.

Código escenario	Presión (psig)	Temperatura (°F)	Flujo (bph)
PCR-1	200	92	1.633
PCR-2	153	220	1.633
PCR-3	135	257	1.633
PCR-4	174	424	1.633
PCR-5	136	325	1.633
PCR-6	229	338	1.633
PCR-7	33	270	83
PCR-8	350	261	1.566
PCR-9	312	410	1.566
PCR-10	258	490	1.566
VAP-1	65	603	1.566
GAS-1	8,5	280	616
GAS-2	148	119	616
GAS-3	112	203	616
GAS-4	113	250	616
GAS-5	60	126	616
GAS-6	211	108	85
GAS-7	112	203	616
GAS-8	60	110	616
GAS-9	123	110	616
GAS-10	100	310	60
GP-1	45	94	31
GP-2	9,3	109	537
KER-1	99	281	330
KER-2	122	250	330
DIE-1	26	338	1.239

Tabla 3.1. Variables de proceso (continuación).

Código escenario	Presión (psig)	Temperatura (°F)	Flujo (bph)
DIE-2	150	388	1.239
DIE-3	203	462	221
DIE-4	203	460	221
DIE-5	234	150	221
NAF-1	24	265	1.600
NAF-2	117	265	1.600
NAF-3	85	165	1.600
NAF-4	57	133	1.600
RES-1	150	440	446
RES-2	150	410	446
RES-3	40	275	446
RTT-1	33	300	1.620
RTT-2	29,6	563	446
RTT-3	9,3	124	616
RTT-4	59	100	85
RTT-5	60	220	620
RTT-6	15,1	388	330
RTT-7	18,5	462	195
AMO-1	150	60	*

* No existe

3.2.2 Condiciones meteorológicas

La estabilidad atmosférica es definida por la capacidad que posee el aire de moverse en forma vertical (hacia arriba o hacia abajo) dentro de la capa de la atmósfera con respecto a la tierra (suelo). Este movimiento es causado por el diferencial del perfil de temperatura y del perfil de la velocidad del viento como resultado del calentamiento solar durante el día y el enfriamiento por radiación durante la noche. Las mediciones de tal fenómeno usualmente son registradas en torres meteorológicas con proyecciones de medidas del viento sobre los 10 metros de altitud desde el nivel de suelo.

Las condiciones meteorológicas de estabilidad atmosféricas para estimaciones de consecuencias y estudios cuantitativos de riesgos son referidas de acuerdo a una categorización asignada por Pasquill/Guifford en el año 1974, descrita a continuación:

Tabla 3.2. Estabilidades atmosféricas.

Pasquill/Guifford	Descripción típica
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Moderadamente inestable
D	Neutral
E	Estable
F	Muy estable

La relación entre las categorías de estabilidades atmosféricas de Pasquill/Guifford, velocidad del viento, intensidad del calentamiento solar y la nubosidad en comparación con los parámetros meteorológicos de la zona en los últimos 10 años suministrado por la estación meteorológica de Barcelona – aeropuerto de la fuerza aérea venezolana (FAV), posicionan a la Refinería Puerto La Cruz con las siguientes condiciones meteorológicas, las cuales son las más desfavorables en caso de que se genere un evento :

Tabla 3.3. Condiciones meteorológicas del área (F.A.V, 2000)

Velocidad del viento (m/s)	1	2,7
Estabilidad atmosférica	F	D
Humedad relativa (%)	76	76
Temperatura del aire (°C)	26	29
Temperatura del suelo (°C)	30	33

3.2.3 Orificios de fuga

Se seleccionaron como posibles orificios de fuga los que representan un diámetro equivalente a 1/4, 1 y 6 pulgadas, y en aquellos casos donde el

diámetro de la tubería es menor a 6 pulgadas se consideró la rotura total de la misma. Estos diámetros permiten evaluar las consecuencias ocasionadas por fugas de sustancias tóxicas y/o inflamables tanto dentro como fuera de los límites de la instalación.

El tamaño de los orificios de fuga está relacionado con problemas por corrosión, fallas en uniones bridadas, conexiones de instrumentos, perforación por impactos externos y pérdidas de propiedades de los sellos, entre otros.

3.2.4 Dosis equivalentes de daños

Para obtener resultados significativos al usar el método de análisis cuantitativo de riesgos, es imperativo evaluar las consecuencias. Para llevar a cabo tal evaluación se establecieron criterios de daños referidos a efectos de productos tóxicos, incendios y explosiones generados por los posibles escenarios de accidentes.

El uso de la dosis equivalente de daños (DED) representa grados de peligros similares para los efectos por radiación, sobrepresión y tóxico. Las DED se obtuvieron a través de relaciones probabilísticas de afectación llamadas ecuaciones Probit, en donde el tiempo de exposición a un nivel de peligro es referida como la dosis.

A los efectos de cuantificar el riesgo individual y social de cada uno de los escenarios analizados, se tomaron como dosis equivalentes de daños (DED), las correspondientes a los niveles de 1%, 50% y 99% de posibilidad de fatalidad.

La tabla 3.4 presenta la relación entre los valores de Probit correspondientes para los niveles de fatalidades seleccionados en el estudio.

Tabla 3.4. Valores de Probit en función de los niveles de fatalidades (Zambrano, 2007).

Probit	Fatalidades
2,67	1%
5	50%
7,33	99%

A continuación se presentan las ecuaciones Probit para el cálculo de los niveles de radiación, sobrepresión y concentración de tóxico con el fin de cuantificar la afectación al personal que está expuesto.

❖ Para efectos por radiación la ecuación Probit aplicada es la siguiente:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln \left(\frac{tI^{4/3}}{10^4} \right) \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde:

Pr= número Probit

t= tiempo efectivo de duración (s)

I= intensidad efectiva de radiación (kW/m^2)

Si t es igual a 30 segundos y sustituyendo el valor de Probit correspondiente al 1% de fatalidad en la ecuación 3.1 se obtiene:

$$2,67 = -12,8 + 2,56 \ln \left(\frac{30I^{4/3}}{10^4} \right)$$

$$I = 7,27 \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

De igual forma se procede para 50 y 99% de fatalidades (anexo C).

❖ Para efectos por sobrepresión la ecuación de Probit aplicada es la siguiente:

$$P_r = 1,47 + 1,37 \text{ Ln } (P) \quad (\text{Ec.3.2})$$

Donde:

Pr= número Probit

P= pico de sobrepresión (psig)

Sustituyendo el valor de Probit correspondiente al 1% de fatalidades en la ecuación 3.2 se obtiene:

$$2,67 = 1,47 + 1,37 \text{ Ln } (P)$$

$$P = 2,40 \text{ Puig}$$

De igual forma se procede para 50 y 99% de fatalidades (anexo C).

❖ Para efectos tóxicos la ecuación de Probit aplicada es la siguiente:

$$P_r = a + b \text{ Ln}(C^n t) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

Pr= probit

C= concentración (ppm)

t= tiempo de exposición (min)

a, b y n son constantes de letalidad para la ecuación Probit

La sustancia tóxica presente en la unidad DA-3 es amoníaco y los valores de las constantes de letalidad para dicha sustancia son los siguientes:

a= -35,9 (ppm)

b= 1,85 (ppm)

n=2 (min)

Sustituyendo las constantes de letalidad y el probit correspondiente al 1% de fatalidad de la tabla 3.2, en la ecuación 3.3 se obtiene:

$$2,67 = -35,9 + 1,85 \text{Ln}(C^2 10)$$

$$C = 10.647$$

De igual forma se procede para 50 y 99% de fatalidades (anexo C).

3.3 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos peligrosos de la unidad destiladora atmosférica DA-3

Uno de los aspectos más importantes en los análisis cuantitativos de riesgos es la evaluación de la frecuencia con que puede ocurrir un accidente determinado, que ha sido identificado como potencialmente factible de suceder.

Para la estimación de frecuencias de cada uno de los eventos se empleó el método de árbol de eventos, para lo cual se necesitó conocer previamente la frecuencia de falla de cada uno de los elementos que formaban parte de los escenarios seleccionados, es decir la frecuencia de falla de cada válvula, brida, intercambiadores de calor, bombas y tuberías, entre otros, y la probabilidad de falla asociada a dichos elementos. Para lograrlo se utilizó el método de árbol de fallas, en el cual se tomaron como base recopilaciones estadísticas de informaciones provenientes de diversas fuentes, de diferentes países, industrias y ambientes, debido a que

actualmente, la industria petrolera y petroquímica no cuenta con una base de datos estadísticos de fallas de equipos.

En caso de que el orificio de fuga correspondiente al escenario estudiado no se encontrara en la base de datos entonces se realizaron extrapolaciones e interpolaciones dependiendo del caso en estudio.

Esta base de datos está contenida en el manual de ingeniería de riesgos en su apartado IR-S-02. En las tablas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, mostrándose las frecuencias de fallas por rotura en instalaciones de refinación, suministro y procesamiento de gas.

Tabla 3.5. Frecuencia de fallas por rotura en bombas centrífugas (PDVSA, 2004).

Descripción	Bombas excluyendo todas las válvulas, tuberías y accesorios hasta la primera brida, incluyendo ésta última	
Frecuencia de fallas	1,71E-02 por bomba anual	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm)	P (d<dm)
	10 mm	0,82
	50 mm	0,96
	Rotura total	1
Nota	Rotura total es usualmente considerado como el diámetro interno de la tubería de mayor diámetro conectada a la bomba	

Tabla 3.6. Frecuencia de fallas por rotura en recipientes (PDVSA, 2004).

Descripción	Recipientes excluyendo todas las válvulas, tuberías y accesorios hasta la primera brida, incluyendo ésta última	
Frecuencia de fallas	7,50E-05 por recipiente anual	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm)	P (d<dm)
	25 mm	0,54
	50 mm	0,89
	150 mm	0,96
	Rotura total	1
Nota	Rotura total es usualmente considerado como el diámetro interno de la tubería de mayor diametro conectada a la bomba	

Tabla 3.7. Frecuencia de fallas por rotura en bridas (PDVSA, 2004).

Descripción	Unión bridada. Normalmente fallan por pérdida de pernos y tuercas y falla de empaaduras	
Frecuencia de fallas	8,8E-05 por brida anual	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm/D)	P (d<dm)
	0,1	0,96
	1	1
Nota	D es el diámetro interno de la tubería conectada a la brida	

Tabla 3.8. Frecuencia de fallas por rotura en válvulas (PDVSA, 2004).

Descripción	Cuerpo de la válvula, resorte y empaadura. Se excluyen uniones bridadas	
Frecuencia de fallas	8,8E-05 por válvula anual	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm/D)	P (d<dm)
	0,05	0,65
	0,1	0,88
	0,2	0,94
	1	1
Nota	D es el diámetro interno de la tubería conectada a la válvula	

Tabla 3.9. Frecuencia de fallas por rotura tubería de proceso (PDVSA, 2004).

Descripción	Tubería de procesos excluyendo todas las bridas y válvulas	
Frecuencia de fallas	1,48E-07 por metro de tubería anual	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm/D)	P (d<dm)
	0,05	0,6
	0,22	0,85
	0,45	0,95
	1	1

Tabla 3.10. Frecuencia de fallas en intercambiadores de calor tipo carcaza y tubos (PDVSA, 2004).

Descripción	Intercambiador excluyendo todas las válvulas, tuberías y accesorios hasta la primera brida, incluyendo ésta última	
Frecuencia de fallas	a) 1,50E-04 por recipiente anual (carcaza) b) 1,30E-05 por recipiente anual (tubos)	
Distribución de tamaño de orificio	Tamaño de orificio (dm)	P (d<dm)
	25 mm	0,54
	50 mm	0,89
	150 mm	0,96
	Rotura total	1
Notas	El equipo es básicamente un recipiente a presión, pero la frecuencia ha sido modificada para incluir fugas por la carcaza debidas a rotura de tubos, Rotura total es usualmente considerada como el diámetro interno de la tubería de mayor diámetro conectada al equipo	

Con las frecuencias de fallas, probabilidades de fallas, longitudes de tubería, número de bridas, número de válvulas, bombas, intercambiadores y recipientes involucrados en cada escenario se procedió a realizar el árbol de fallas como se muestra en la figura 3.1, tomando como ejemplo el escenario PCR-1.

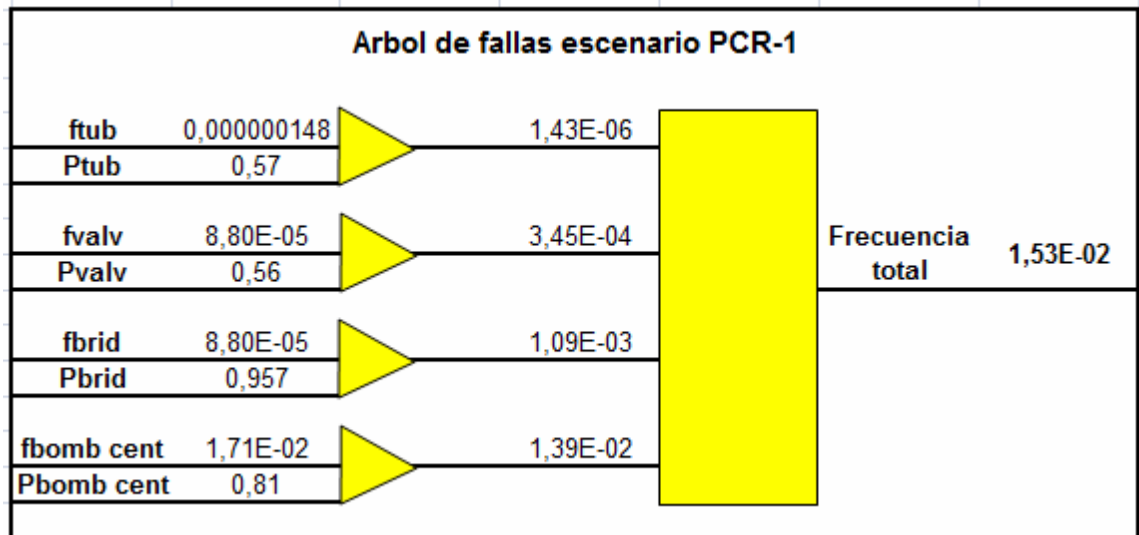


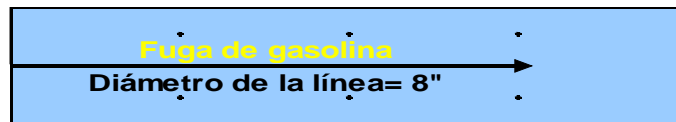
Figura 3.1. Árbol de fallas.

Para calcular la frecuencia de falla de la tubería se multiplicó por la probabilidad de falla de la misma y por la longitud de tubería del escenario para obtener la frecuencia de falla del elemento. De la misma manera se procedió con todos los elementos que conformaban el escenario consiguiendo así la frecuencia de falla de cada elemento por separado, posteriormente se sumaron para obtener la frecuencia de falla del escenario.

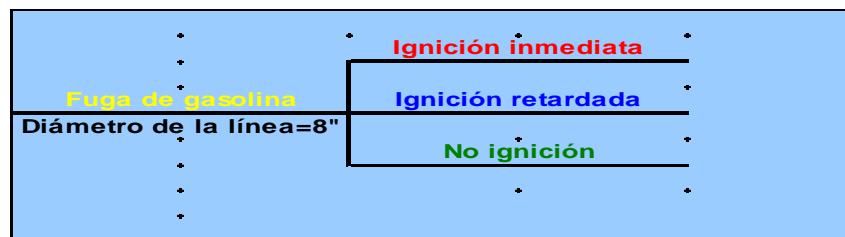
En el anexo D se muestran los árboles de fallas de los escenarios más frecuentes y los que dieron como resultados las mayores consecuencias. En el anexo E se muestran las frecuencias de fallas totales para los distintos escenarios.

Una vez realizado los árboles de fallas se procedió a desarrollar los árboles de eventos. Cada rama del árbol representa un escenario separado. La secuencia de eventos es mostrada a continuación:

Se identificó el evento iniciador. El evento iniciador normalmente corresponde a la descarga de un material peligroso, a través de la rotura de una tubería, recipiente o explosión interna, entre otros.



❖ Se clasificaron los escenarios en categorías de consecuencias similares



❖ Se estimó la probabilidad de cada una de las ramas del árbol. Cada título en el árbol de eventos corresponde a una probabilidad condicional de algún escenario, si el evento que le procede ha ocurrido. Las probabilidades de ocurrencias para ignición inmediata, retardada y explosión, dada una ignición fueron tomadas del manual de ingeniería de riesgos en su apartado IR-S-02 (tabla 3.11).

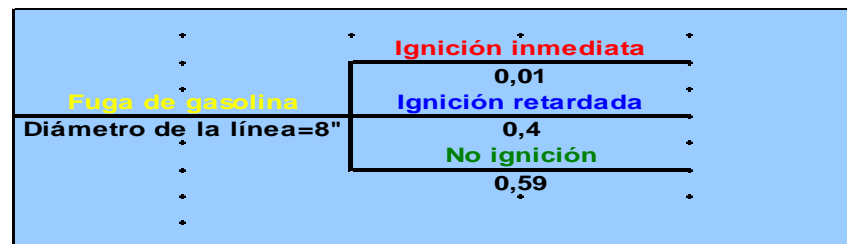
Tabla 3.11. Probabilidad de ignición de fugas de gas, líquido y explosión dada la ignición (PDVSA, 2004).

Fuga	Probabilidad de ignición		Probabilidad de explosión dada ignición
	Gas	Líquido	
Menor (< 1 kg/s)	0,01	0,01	0,04
Mayor (1 - 50 kg/s)	0,07	0,03	0,12
Masiva (> 50 kg/s)	0,3	0,08	0,3

La probabilidad de ignición retardada se tomó en cuenta dependiendo de la densidad y distribución de la fuente de ignición alrededor de la instalación (tabla 3.12).

Tabla 3.12. Probabilidad de ignición retardada (PDVSA, 2004).

Ignición retardada	Probabilidad
Alta	0,8
Media	0,6
Baja	0,4



- ❖ Se cuantificaron los escenarios. La frecuencia de cada escenario se determinó multiplicando la frecuencia del evento iniciador por la probabilidad condicional a lo largo del desarrollo del árbol para ese escenario.

En la figura 3.2 se muestra un árbol de eventos de una tubería de 8 pulgadas de diámetro, que transporta crudo.

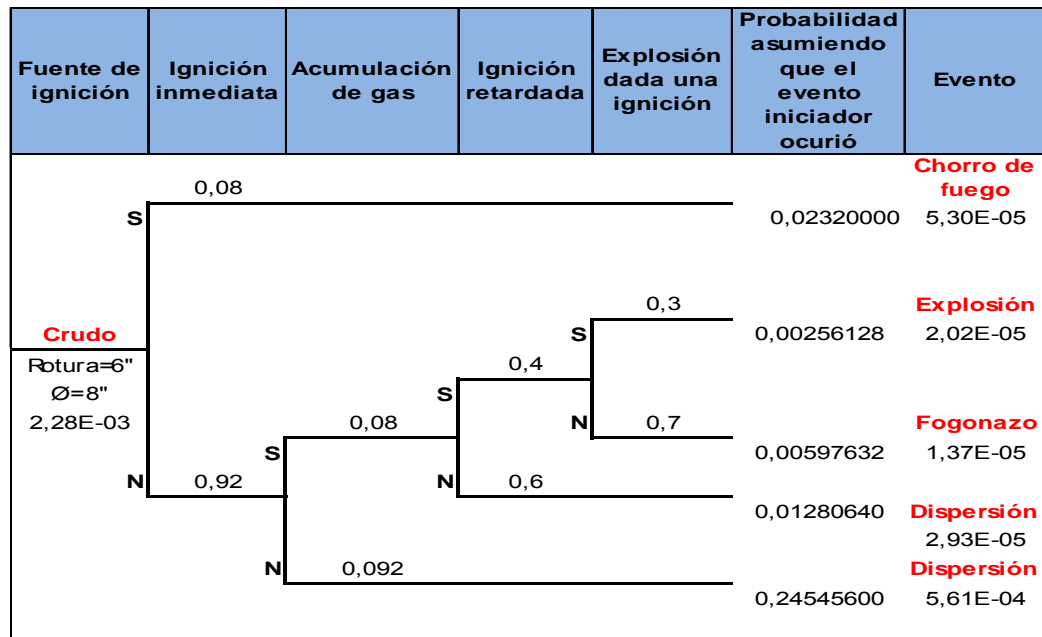


Figura 3.2 Árbol de eventos

De igual forma se elaboraron los árboles de eventos para cada escenario seleccionado. En el anexo F se muestran los árboles de eventos para los escenarios más frecuentes y los que dieron como resultados las mayores consecuencias. En el anexo G se muestran las frecuencias totales de los eventos para los distintos escenarios.

Luego se determinaron las frecuencias totales de cada evento multiplicando las frecuencias de los eventos topos por las condiciones ambientales.

En la tabla 3.13 se muestran las probabilidades de ocurrencia de cada estabilidad atmosférica, conjuntamente con los parámetros asociados a las condiciones ambientales.

Tabla 3.13. Probabilidad de las condiciones ambientales.

Estabilidad atmosférica	Probabilidad para la estabilidad	Velocidad del viento	Dirección del viento	Dirección del escape
D	0,85	0,75	0,6	1
F	0,15	0,25	0,4	1

3.4 Determinación de los niveles de riesgos individual y/o social existentes en la unidad destiladora atmosférica a estudiar

Para cuantificar el riesgo es necesario combinar la información sobre las frecuencias de ocurrencia de eventos y las consecuencias o magnitud de daños calculadas anteriormente, así como también la distribución geográfica de cada uno de los escenarios.

Se dibujaron sobre el plano de planta las secciones de tuberías correspondiente a cada escenario (anexo H); sobre cada sección de tubería se graficaron las consecuencias asociadas a dichos escenarios para cada orificio de fuga y cada estabilidad atmosférica (D y F), usando como herramienta el programa computarizado Autocad.

Para obtener los niveles de riesgo individual, fue necesario sumar cada una de las frecuencias de ocurrencia asociada a cada curva de consecuencia en cada nivel de la planta, hasta alcanzar los niveles de riesgo meta establecidos por la industria petrolera y petroquímica nacional, ya que la unidad cuenta con un pasillo de bombas, torres y hornos en la planta baja, intercambiadores y tambores en el primer piso y por último intercambiadores en el segundo piso.

Al obtener los riesgos metas a través de la sumatoria de frecuencias se comparó con los criterios de tolerancia establecidos por PDVSA con el fin de categorizar los niveles de riesgos en: intolerable, reducible o mínimo (tabla 3.14).

Tabla 3.14. Criterios de tolerancia de riesgo individual (PDVSA, 2004).

Etapas	Descripción
$f > 1,0 \times 10^{-3}/\text{año}$	Intolerable
$1,0 \times 10^{-4} < f \leq 1,0 \times 10^{-3}/\text{año}$	Reducible: Aplicación de análisis costo-beneficio-riesgo
$f \leq 1,0 \times 10^{-4}/\text{año}$	Mínimo

El riesgo social no fue calculado debido a que los resultados de consecuencias no traspasan los límites de propiedad de la unidad lo que garantiza la no afectación de la población de El Chaure y otras poblaciones cercanas.

3.5 Evaluación del diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad destiladora atmosférica DA-3 mediante el uso de mejores prácticas de diseño

Posterior al cálculo del nivel de riesgo se realizó una evaluación del diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad, para lo cual se consideraron una serie de normas relacionadas con la seguridad en el diseño de una planta, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: IR-I-01 (sistema de detección y alarma de incendio), IR-C-03 (revestimiento contra incendio), IR-M-01 (separación entre equipos e instalaciones), MDP-08-SA-05 (instalación de válvulas de alivio de presión), IR-1-02 (sistemas de

detección de gases inflamables/tóxicos), SI-S-21 (revisión pre-arranque) y manual de ingeniería de diseño volumen 22, entre otras.

El proceso consistió en realizar una lista de chequeo en las cuales se realizaban una serie de preguntas relacionadas con las consideraciones que debieran tomarse en cuenta a la hora de diseñar una planta. Estas preguntas fueron respondidas con inspecciones en la unidad, con el fin de observar si la misma cumplía o no con las condiciones de un diseño totalmente seguro establecido por las normas anteriormente mencionadas.

En la tabla 3.15 se muestra la lista de chequeo empleada para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad donde se observan los aspectos evaluados para el ACR de la unidad DA-3.

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3.

Documentación requerida	Si	No	Observaciones
1. ¿Se dispone de los diagramas de flujo de proceso?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Documentación requerida	Si	No	Observaciones
2. ¿Se dispone de los diagramas de tubería e instrumentación?			
3. ¿Se dispone de un manual de operación?			
4. ¿Se dispone de la composición molar de las corrientes?			
5. ¿Se dispone del inventario de líquidos de los recipientes?			
6. ¿Se dispone de las hojas de datos de seguridad de las sustancias (MSDS)?			
7. ¿Se dispone de los planos de clasificación eléctrica de áreas?			
8. ¿Se ha elaborado un estudio de riesgo previamente?			
9. ¿Se dispone de informes de historial de accidentalidad de la planta?			
10. ¿Se dispone de informes de historial de fallas de la planta?			
11. ¿Se dispone de plan de emergencia y contingencia?			
12. ¿Se dispone de un procedimiento escrito para identificar y probar periódicamente las alarmas críticas contra fuego y/o gases tóxicos?			
Aislamiento	Si	No	Observaciones
1. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento para protección personal?			
2. ¿Permanecerá el aislamiento en sitio cuando se le aplique un chorro de agua contra incendio a alta velocidad?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Aislamiento	Si	No	Observaciones
3. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a válvulas e instrumentos de medición y control?			
4. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a prueba de fuego en recipientes, equipos elevados o soportes de tubería?			
5. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a prueba de fuego u protección para conductos críticos como cables eléctricos y dispositivos de cierre remoto?			
6. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a faldas de equipos de proceso?			
7. ¿Se ha mantenido el aislamiento a prueba de fuego alejado de los recipientes aislados internamente?			
Pavimentación, drenajes y fundaciones	Si	No	Observaciones
1. ¿Está el piso totalmente pavimentado donde pueden producirse derrames de líquidos inflamables o peligrosos?			
2. ¿Está el pavimento inclinado para alejar y vaciar derrames que se pudieran acumular debajo de equipos y estructuras?			
3. ¿Puede el sistema de drenaje manejar la máxima rata de aplicación de agua contra incendio?			
4. ¿Están los drenajes completamente inundados, con el fin de evitar espacios de vapor donde pudiera producirse explosión?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Pavimentación, drenajes y fundaciones	Si	No	Observaciones
5. ¿Están las fundaciones y los equipos adecuadamente diseñadas para cualquier eventualidad de terremotos?			
6. ¿Tiene el sistema de drenaje para tempestad y agua contra incendio de áreas de hidrocarburos, trampas para evitar que se viertan los hidrocarburos en propiedad ajena?			
Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
1. ¿Se ha provisto de adecuadas facilidades de drenaje de emergencia para cualquier líquido peligroso dentro del edificio, con el fin de evitar pozos de líquido ardiente dentro del piso horizontal de un edificio o estructura?			
2. ¿Se ha minimizado el uso de ventanas?. ¿Si existen ventanas están hechas de vidrio de seguridad?			
3. ¿Contribuyen los componentes del edificio a la combustión o liberación de materiales nocivos cuando está expuestos al fuego?			
4. ¿Están las plataformas y barandas adecuadamente diseñadas para evitar que la gente resbale en los mismos?			
5. ¿Tienen las puertas de emergencia de incendio fusibles pasadores de cierre?			
6. ¿Es la altura libre sobrecabeza adecuada en los pasillos y las áreas de trabajo?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
7. ¿Están las estructuras y los soportes aislados a prueba de fuego para evitar un colapso en caso de incendio			
8. ¿Proporcionan las plataformas suficiente espacio libre para operación y mantenimiento de equipos?			
9. ¿Se ha considerado la colocación de paredes resistentes a la explosión para proteger el equipo y al personal en las áreas adyacentes?			
10. ¿Se han evitado bolsillos de agua sin drenaje en miembros estructurales?			
11. ¿Están las salidas de ventilación ubicadas donde no crearán un problema?			
12. ¿Se han ubicado entradas de aire donde no le entrarán contaminantes?			
13. ¿Tiene cada edificio o estructura por lo menos dos salidas?			
14. ¿Tienen las puertas de salida sus aperturas hacia afuera?			
15. ¿Están las rutas de escape lo más lejos posible de los sitios próximos a derrames de tóxicos o incendios?			
16. ¿Existen señales de dirección claras para las rutas de escape en cualquier área complicada?			
17. ¿Existe una adecuada iluminación de emergencia?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
18. ¿Están los dispositivos de parada de emergencia ubicados cerca de rutas de escape donde puedan ser alcanzados sin mucho peligro adicional en caso de emergencia?			
Riesgos eléctricos	Si	No	Observaciones
1. ¿Se han especificado los suministros de energía de emergencia adecuados?			
2. ¿Han sido protegidos los tendidos de cables contra fuego y explosión instalándolos por debajo de tierra en bandejas aisladas?			
3. ¿Están todos los sistemas de detección y alarma para emanaciones tóxicas o inflamables conectadas a los suministros de energía de emergencia?			
Protección contra incendios	Si	No	Observaciones
1. ¿Se suministra el agua contra incendio desde una fuente independiente y de adecuada capacidad?			
2. ¿Son las bombas de agua contra incendio de tamaño adecuado? ¿Tienen fuentes de suministro de energía confiables?			
3. ¿Están los monitores e hidrantes ubicados a una distancia razonable de todo equipo de proceso, equipo de servicios y patios de tanques?			
4. ¿Existe un adecuado número de dispositivos de alarmas contra incendios y buen sistema de alarma de evacuación?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Protección contra incendios	Si	No	Observaciones
5. ¿Se le ha dado consideración adecuada a la necesidad de sistemas de espumas, sistemas de rociadores y de inundación, cortinas de vapor y de agua, y sistemas de dióxido de carbono y de químico seco?			
6. ¿Existen adecuadas paredes contra incendio?			
7. ¿Los materiales propuestos contra incendio son compatibles con todos los materiales de proceso?			
8. Se ha suministrado vapor de sofocamiento o nitrógeno para los calentadores de llama y para válvulas de seguridad que descargan los gases combustibles directamente a la atmósfera?			
Disposición en planta	Si	No	Observaciones
1. ¿Hay una adecuada separación entre los bloques de equipos?			
2. ¿Dónde no se pueda obtener adecuado espacio, se ha provisto de cortinas de vapor o de agua?			
3. ¿Son los bloques de equipos lo suficientemente pequeños para suministrar agua contra incendio?			
4. ¿Es el acceso adecuado para un mantenimiento futuro sencillo, y por lo tanto seguro?			
5. ¿Están las áreas críticas para la operación de planta lo más lejos de las áreas de altos riesgos?			
6. ¿Existe adecuada provisión para el drenaje de líquidos inflamables?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Disposición en planta	Si	No	Observaciones
7. ¿Están todas las unidades peligrosas ubicadas a una distancia segura de la periferia del sitio?			
8. ¿Están las áreas donde la gente se concentra ubicadas en la periferia de la planta y vientos arriba del material combustible?			
9. ¿Están los soportes de tubería (pipe racks) ubicados donde no interfieran o puedan ser dañados por grúas u otros vehiculos?			
10. ¿Están la mayoría de los equipos ubicados en lo posible, cercanos a nivel de piso?			
11. ¿Están los equipos de protección contra incendio ubicados en un lugar seguro; pero a la vez en un sitio donde puedan ser movidos con facilidad a cualquier otro sitio?			
12. ¿Está el estacionamiento ubicado en la periferia de la planta, donde el tráfico no tiene que pasar a través de las áreas de proceso?			
Hornos	Si	No	Observaciones
1. ¿Existe adecuada previsión para un corte o detección automática de combustible al haber falla de llama?			
2. ¿Existen ciegos adecuados para mantenimiento?			
3. ¿Existen válvulas de retención o de bloqueo para evitar flujo en retroceso?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Recipientes	Si	No	Observaciones
1. ¿Hay una protección adecuada contra sobrepresión o vacío?			
2. ¿Tienen los manómetros e indicadores de nivel y los controladores una protección adecuada?			
3. ¿Existen bocas de visita adecuadas para inspección, limpieza y mantenimiento, y para una adecuada evacuación de emergencia del personal?			
4. ¿Existen escaleras internas y agarraderas adecuadas, requeridas para el acceso de mantenimiento e inspección?			
Equipos rotativos	Si	No	Observaciones
1. ¿Están los equipos que manejan materiales inflamables ubicados en las afueras cuando sea posible?			
2. ¿Se han hecho provisiones adecuadas para inspección y mantenimiento?			
3. ¿Se han instalado válvulas de bloqueo operadas remotamente donde grandes fugas pudieran ser peligrosas?			
4. ¿Se han instalado sellos mecánicos dobles en las bombas que manejan materiales inflamables o peligrosos?			
5. ¿Se han provisto de paros automáticos para las siguientes anomalías: baja presión de succión, excesiva temperatura de proceso, baja presión de aceite de sello, fuga o goteo materiales inflamables y/o alta vibración del eje?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Tuberías	Si	No	Observaciones
1. ¿Están las válvulas de parada de emergencia ubicadas donde puedan ser utilizadas con seguridad si ocurre una emergencia?			
2. ¿Están los controladores y válvulas de control fácilmente accesibles para su mantenimiento?			
3. ¿Están las válvulas de seguridad o venteo que descargan a la atmósfera en dirección a las áreas de operación?			
4. ¿Pueden ser alcanzadas con facilidad todas las válvulas de emergencia y suiches?			
5. ¿Se ha elaborado un adecuado sistema de identificación para que las líneas puedan ser fácilmente identificadas en una emergencia?			
Detectores de gases inflamables/tóxicos	Si	No	Observaciones
1. ¿Existen detectores que permitan detectar gases o vapores inflamables/tóxicos?			
2. ¿Los detectores están instalados orientados hacia abajo sobre el equipo o área a proteger?			
3. ¿Están instalados alejados de posibles descargas de líquidos, a fin de evitar inmersión o contacto directo con los mismos?			
4. ¿El punto de instalación del detector es accesible para la calibración y mantenimiento?			
5. ¿Los detectores están incorporados en los programas de mantenimiento preventivo?			

Tabla 3.15. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Revestimiento contra incendio	Si	No	Observaciones
1. ¿Están adecuadamente protegidos los sopotes de tuberías?			
2. ¿Están adecuadamente protegidos las líneas de señales de instrumentación?			
3. ¿Están adecuadamente protegidos los soportes de equipos de combustión?			
4. ¿Están adecuadamente protegidos las bandejas de cables eléctricos?			
Otros	Si	No	Observaciones
1. ¿Existe una manga del viento? ¿Se encuentra en el punto más alto de la planta?			
2. ¿Existe estaciones de seguridad y duchas lava-ojos en las zonas peligrosas?			
3. ¿Todas las alarmas son audibles y visibles en el tablero de control?			
4. ¿Existe alarma local y/o en la sala de control para alertar a los operadores de la unidad cuando se haya activado una ducha?			

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Identificación de los posibles eventos peligrosos existentes en la unidad destiladora atmosférica DA-3

En la tabla 4.1 se muestran cada uno de los escenarios obtenidos, los equipos involucrados en cada escenario y la sección a la cual pertenecen para el análisis cuantitativo de riesgos. Estos escenarios fueron seleccionados evaluando tramo por tramo de la planta con el fin de incluir todos los equipos presentes en la unidad DA-3 obteniendo de esta manera un estudio completo de dicha unidad.

Tabla 4.1. Identificación de escenarios.

N° de escenario	Descripción	Equipos involucrados	Sección	Código
1	Fuga/rotura en línea de bombas P-1/1A hasta entrada intercambiador E-1E	P-1/1A	Precalentamiento	PCR-1
2	Fuga/rotura en sistema de precalentamiento desde E-1E (lado tubo) hasta descarga E-1A (lado tubo) incluye E-1 D/C/B (lado tubo)	E-1E/D/C/B/A		PCR-2
3	Fuga/rotura en precalentamiento desde intercambiador E-3B (lado tubo) hasta descarga E-3A (lado tubo)	E-3B/3A		PCR-3
4	Fuga/rotura en sistema de precalentamiento desde intercambiador E-8 (lado tubo) hasta E-18	E-8		PCR-4
5	Fuga/rotura en intercambiador E-18 (lado casco) hasta E-6B	E-18		PCR-5
6	Fuga/rotura en intercambiador E-6B (lado tubo) hasta alimentación V-1 incluye E-6A (lado tubo)	E-6B/6A		PCR-6
7	Fuga/rotura en tubería tope torre V-1 hasta V-3	Tubería		PCR-7
8	Fuga/rotura en línea de bombas P-2/2A hasta entrada intercambiador E-7B	P-2/2A		PCR-8
9	Fuga/rotura en sistema de intercambiadores desde E-7B (lado tubo) hasta descarga E-7A (lado tubo)	E-7B/7A		PCR-9

Tabla 4.1. Identificación de eventos (continuación).

N° de escenario	Descripción	Equipos involucrados	Sección	Código
10	Fuga / rotura en sistema de intercambiadores desde E-17 (lado tubo) hasta descarga E-10A incluye E-10B (lado casco)	E-17 y E-10B/10A	Pre calentamiento	PCR-10
11	Fuga/rotura en línea de descarga de horno H-1 hasta fraccionadora V-3	Tubería	Vaporización	VAP-1
12	Fuga/rotura en tope fraccionadora V-3 hasta acumulador V-7 incluye condensadores E-11 A/B y E-12 F/E/D/C/B/A (lado casco)	E-11A/B y E-12F/E/D/C/B/A	Gasolina	GAS-1
13	Fuga/rotura en línea de bombas P-101/101A hasta entrada intercambiador E-101	P-101/101A		GAS-2
14	Fuga/rotura en intercambiador E-101 (lado casco) hasta E-102	E-101		GAS-3
15	Fuga/rotura en intercambiador E-102 (lado casco) hasta alimentación torre T-101	E-102		GAS-4
16	Fuga/rotura en tope de T-101 hasta V-101 incluye E-104 A/B (lado casco)	E-104A/104B		GAS-5
17	Fuga/rotura en línea de bombas P-103/103A hasta torre T-101	P-103/103A		GAS-6
18	Fuga/rotura en intercambiador E-101 (lado tubo) hasta E-105	E-101		GAS-7
19	Fuga/rotura en intercambiador E-105 (lado casco) hasta succión de bombas P-102/102A	E-105		GAS-8
20	Fuga/rotura en línea de bombas P-102/102A hasta fin límite batería UDA-3	P-102/102A		GAS-9
21	Fuga/rotura en sistema reboiler torre estabilizadora T-101	E-103		GAS-10
22	Fuga/rotura en descarga de V-101 hasta alimentación V-2	Tubería	Gas de proceso	GP-1
23	Fuga/rotura en línea descarga V-7 hasta el quemador	Tubería		GP-2
24	Fuga/rotura en línea de bombas P-8/7A hasta entrada intercambiador E-3A	P-8/7A	Querosén	KER-1
25	Fuga/rotura desde intercambiador E-3A (lado casco) hasta fin límite batería incluye E-3B, E-4, E-5 (lado casco)	E-3A/3B, E-4 y E-5		KER-2

Tabla 4.1. Identificación de eventos (continuación).

N° de escenario	Descripción	Equipos involucrados	Sección	Código
26	Fuga/rotura en punto de separación A hasta succión de bombas P-6/6A	Tubería	Diesel	DIE-1
27	Fuga/rotura en línea de bombas P-6/6A hasta entrada intercambiador E-7A	P-6/6A		DIE-2
28	Fuga/rotura en línea de bombas P-7/7A hasta entrada intercambiador E-8	P-7/7A		DIE-3
29	Fuga/rotura en intercambiador E-8 (lado casco) hasta E-9	E-8		DIE-4
30	Fuga/rotura desde intercambiador E-9A (lado casco) hasta fin límite batería incluye E-9B	E-9A/9B		DIE-5
31	Fuga/rotura desde tubería de descarga de V-3 hasta succión de bombas P-5/6A	Tubería	Nafta	NAF-1
32	Fuga/rotura en bombas P-5/6A hasta intercambiador E-1A	P-5/6A		NAF-2
33	Fuga/rotura en sistema de intercambiadores desde E-1A hasta descarga E-1E incluye E-1D/C/B (lado casco)	E-1A/B/C/D/E		NAF-3
34	Fuga/rotura desde intercambiador E-2A hasta V-3 incluye E-2B (lado casco)	E-2A/2B		NAF-4
35	Fuga / rotura en bombas P-9 A/B hasta E-10A	P-9A/9B	Residual	RES-1
36	Fuga/rotura desde intercambiador E-10A (lado tubo) hasta descarga E-17 (lado casco) incluye E-10B (lado tubo)	E-10A/10B y E-17		RES-2
37	Fuga/rotura en intercambiador E-102 (lado tubo) hasta fin límite de batería	E-102		RES-3
38	Fuga/rotura fondo torre V-1	Torre V-1	Recipiente, tambores y torres	RTT-1
39	Fuga/rotura fondo fraccionadora V-3	Torre V-3		RTT-2
40	Fuga/rotura en acumulador V-7	Acumulador V-7		RTT-3
41	Fuga/rotura en tambor V-101	Tambor V-101		RTT-4
42	Fuga/rotura fondo torre T-101	Torre T-101		RTT-5
43	Fuga/rotura en despojador V-5	Despojador V-5		RTT-6
44	Fuga/rotura en despojador V-4	Despojador V-4		RTT-7
45	Fuga/rotura en recipiente de amoníaco	Recipiente de amoníaco	AMO-1	

Sólo se consideraron posibles escenarios en el lado crudo o producto porque el otro lado posible es agua y no representa riesgo de fogonazo, explosión, chorro de fuego y/o piscina de fuego. Por ejemplo los intercambiadores E-2 A/B, E-4, E-5 y E-9 A/B son producto/agua, por lo tanto por el lado donde fluye el agua no se tomó en consideración ya que ésta no representa un riesgo. Para el caso de los intercambiadores E-6 A/B, E-7 A/B y E-18 que son crudo/diesel y crudo/residual respectivamente no se consideraron por el lado diesel y residual ya que las variables de operación presión y/o temperatura disminuían significativamente, por ende las consecuencias de los escenarios que los precedían los abarcaban no siendo necesario estimar sus respectivas consecuencias.

La tabla 4.2 señala el número de escenarios obtenidos para cada sección de estudio.

Tabla 4.2. Distribución de escenarios.

Secciones	N° de escenarios
Pre calentamiento	10
Vaporización	1
Gasolina	10
Gas de proceso	2
Querosén	2
Diesel	5
Nafta	4
Residual	3
Recipientes, tambores y torres	8

Se obtuvo un total de cuarenta y cinco escenarios los cuales están distribuidos de acuerdo a la sección de estudio.

En la figura 4.1 se muestra la distribución de los escenarios de acuerdo a las secciones o nodos identificados en el estudio. La sección de

precalentamiento representada por la línea roja se distribuye desde las bombas P-1/1A hasta la entrada a el horno H-1, la sección de vaporización que va desde la salida del horno H-1 hasta la entrada de la fraccionadora principal V-3 representada por la línea de color blanco, la sección de gasolina representada por la línea azul va desde los vapores producidos por el tope de la fraccionadora V-3 hasta el envío de la gasolina a almacenaje, la sección de gas de proceso representada por la línea de color morado va desde el acumulador V-101 hasta el acumulador V-2, las secciones de querosén, diesel pesado y residual representadas por las líneas de color verde, amarilla y vinotinta respectivamente que van desde la salida de la fraccionadora V-3 hasta almacenaje así como también se agrupo en una sección las torres, tambores y recipientes involucrados en los escenarios estudiados.

Estos escenarios se seleccionaron de acuerdo a las variables de proceso (temperatura, presión y flujo) y al equipo involucrado en el mismo ya que estos aportan diferentes frecuencias de ocurrencias de algún evento en la unidad. Para efectos del estudio los peligros identificados están representados por posibles fugas de sustancias inflamables, combustibles y tóxicas asociadas a roturas en las líneas de proceso ocasionadas por problemas de corrosión, fallas de tuberías, recipientes, bombas, intercambiadores, válvulas, bridas y hasta daños mecánicos externos, entre otros.

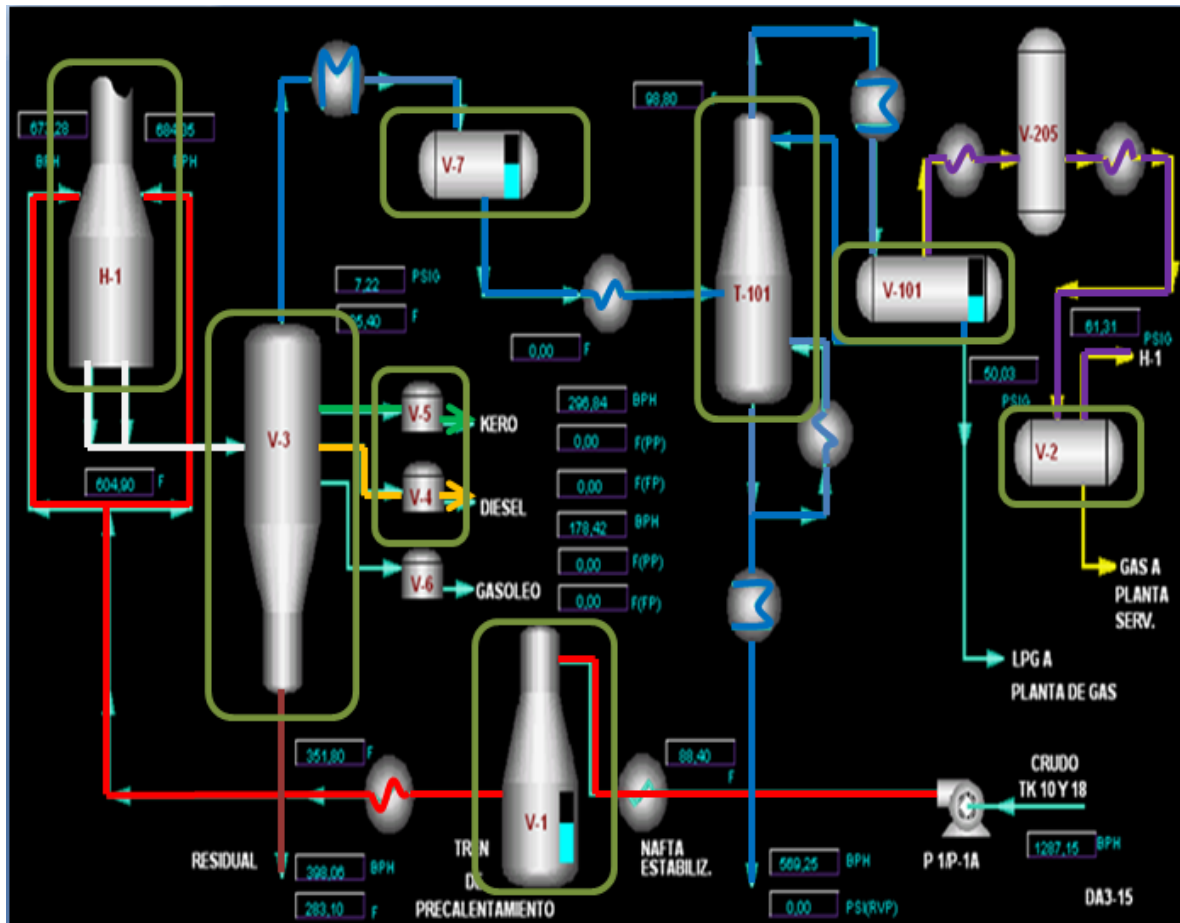


Figura 4.1. Secciones o nodos identificados en el estudio.

4.2 Establecimiento de las consecuencias de los posibles daños ocurridos por los peligros originados en diferentes escenarios de accidentes

En las tablas 4.3 y 4.4 se pueden observar los eventos que presentaron las mayores magnitudes (metros) de consecuencias para la estabilidad D y F, respectivamente. Estas se obtuvieron al establecer los criterios de daños referidos a efectos de productos tóxicos, incendios y explosiones generados por los escenarios de accidentes y a los orificios de fugas (1/4, 1, 6 pulgadas) para cada escenario seleccionado. En los anexos I.1 y I.2 se pueden

encontrar el resto de los escenarios estudiados mostrando las longitudes de consecuencias de acuerdo al orificio de fuga seleccionado y a la dosis equivalente de daños.

Tabla 4.3 Eventos más severos (estabilidad D)

Escenario	Tamaño de orificio (pulg)	Flujo de salida (lb/h)	Fogonazo (m)	Chorro de fuego (m)			Piscina de fuego (m)			Explosión (m)		
			100%	1%	50%	99%	1%	50%	99%	1%	50%	99%
RTT-5	6	390.445	144,4	119	98,4	83,7	25,7	18,6	13,8	*	*	*
RTT-5	6	390.445	144,4	119	98,4	83,7	25,7	18,6	13,8	*	*	*
NAF-4	6	370.504	0,600	*	*	*	32,2	23,1	18,3	*	*	*
PCR-8	6	208.400	100,0	71,9	61,4	55,9	*	*	*	190	*	*

Tabla 4.4 Eventos más severos (estabilidad F)

Escenario	Tamaño de orificio (pulg)	Flujo de salida (lb/h)	Fogonazo (m)	Chorro de fuego (m)			Piscina de fuego (m)			Explosión (m)		
			100%	1%	50%	99%	1%	50%	99%	1%	50%	99%
RTT-5	6	390.445	173,2	123	101	85,1	21,3	14,6	10,3	*	*	*
RTT-5	6	390.445	173,2	123	101	85,1	21,3	15,6	10,3	*	*	*
NAF-4	6	370.504	42,40	*	*	*	27,5	19,3	14,7	*	*	*
PCR-8	6	208.400	102,0	71,9	61,4	55,9	*	*	*	200	*	*

* No existe

Como se puede observar en las tablas 4.3 y 4.4, la consecuencia de mayor impacto para ambas estabildades atmosféricas está representada por el evento de explosión, originado por un orificio de fuga equivalente a 6 pulgadas de diámetro y representado por el escenario PCR-8, el cual alcanza una distancia de 190 m desde el punto de fuga para la estabilidad atmosférica D y de 200 m para la estabilidad F también desde el punto de fuga.

La razón por la cual estos escenarios de explosiones sobresalen sobre los demás se debe a que la densidad de obstáculos es alta debido a que hay más de tres niveles de obstáculos con poca distancia entre sí y una relación

de obstrucción igual al 40%. Así mismo el fluido (crudo) esta sobrecalentado y cuando este es descargado a la atmósfera causa que la velocidad de la línea central de la nube de vapor disminuya al mismo tiempo que aumenta la distancia desde el punto de descarga.

La causa por la cual las longitudes de consecuencias para fogonazos y chorros de fuego son menores en la estabilidad D con respecto a la estabilidad F es debido a que la turbulencia atmosférica se convierte en la fuerza primaria de impulso para la dispersión y ésta se incrementa con el aumento de la velocidad del viento, por ende un incremento de la velocidad del viento causa que la longitud de la nube de vapor disminuya y esto se traduzca en menores longitudes de consecuencias.

4.3 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos peligrosos de la unidad destiladora atmosférica DA-3

El árbol de eventos identifica y cuantifica los posibles escenarios que se generan al ocurrir un evento iniciador, además proporciona una cobertura sistemática de la secuencia de propagación del accidente. En la tabla 4.5 y 4.6 se observan los eventos que se presentaron con mayores frecuencias de ocurrencia para la estabilidad atmosférica D y la estabilidad F respectivamente, de acuerdo al orificio de fuga y el escenario que lo origina. En los anexos G.1 y G.2 se encuentran el resto de las frecuencias de ocurrencia para cada escenario específico calculado en el estudio

Tabla 4.5 Eventos más frecuentes (estabilidad D)

Escenario	Evento	Orificio de fuga (pulg)	Frecuencia del evento (1/año)
GAS-2	Piscina de fuego	1/4	2,46E-04
GAS-9	Fogonazo	1/4	7,37E-05
PCR-1	Chorro de fuego	1/4	5,85E-05
PCR-8	Explosión	1/4	2,76E-06

Tabla 4.6 Eventos más frecuentes (estabilidad F)

Escenario	Evento	Orificio de fuga (pulg)	Frecuencia del evento (1/año)
GAS-2	Piscina de fuego	1/4	9,63E-05
GAS-9	Fogonazo	1/4	2,89E-06
PCR-1	Chorro de fuego	1/4	2,99E-06
PCR-8	Explosión	1/4	1,08E-07

El evento que se presenta con mayor frecuencia de ocurrencia para las estabildades atmosféricas D y F, es una piscina de fuego originada por un orificio de fuga equivalente a 1/4 de pulgadas, lo cual se atribuye a que en este escenario se ve involucrada una bomba centrífuga y estos equipos presentan una frecuencia de falla elevada debido a que son dinámicos y presentan un movimiento relativo entre sus partes, lo cual hace que se produzcan diversos modos de fallas entre los cuales resaltan las de los sellos, rodamientos, anillos de desgaste, impulsor, desalineación de los ejes y acoples, entre otras; esta razón hace que se incremente la frecuencia de ocurrencia de un posible evento. Además los orificios pequeños como el que origina este evento son los que más frecuentemente pueden llegar a ocurrir debido a la corrosión, pinchazos, estoperas de equipos rotativos, tanto en tuberías como en equipos de proceso por ser los de menor magnitud ya que se considera que en la planta existe tanto un control en las actividades que se llevan a cabo como un mantenimiento adecuado de los equipos que no se permitiría la ocurrencia tan frecuente de roturas de mayores diámetros. Se puede apreciar que el escenario GAS-2 estabilidad atmosférica D es el que

presenta mayor frecuencia de ocurrencia, lo cual es lógico porque esta estabilidad representa atmósfera neutra que es la más frecuente en cuanto a las condiciones ambientales.

Así mismo para el resto de los escenarios que se presentaron con mayor frecuencia a saber GAS-9, PCR-1 y PCR-8 se ven afectados de manera similar porque sus escenarios están compuestos por bombas, lo cual hace que la frecuencia de falla del equipo afecte en gran medida la frecuencia total del evento originando así que dichos eventos sean los más frecuentes.

4.4 Determinación de los niveles de riesgos individual y/o social existentes en la unidad destiladora atmosférica a estudiar

En la tabla 4.7 y 4.8 se observan los niveles de riesgos individual obtenidos en cada piso de la unidad en estudio y la frecuencia que permitió clasificarlos en riesgo intolerable, reducible o mínimo de acuerdo a las fatalidades para las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.

Tabla 4.7. Niveles de riesgo individual (estabilidad atmosférica D).

Fatalidad	Piso	Frecuencia	Nivel
1%	Planta baja	5,26E-04	Reducible
	Primer piso	2,01E-04	Reducible
	Segundo piso	4,23E-05	Mínimo
50%	Planta baja	3,45E-04	Reducible
	Primer piso	1,09E-05	Reducible
	Segundo piso	2,03E-05	Mínimo
99%	Planta baja	9,63E-05	Mínimo
	Primer piso	5,22E-05	Mínimo
	Segundo piso	1,19E-05	Mínimo

Decidir si un riesgo es tolerable o no es siempre un tema delicado y subjetivo, que depende en gran parte de la opinión particular de cada persona. Sin embargo, PDVSA dispone de criterios de tolerancia de riesgos que permiten evaluar el significado de los resultados de un análisis cuantitativo de riesgos. De acuerdo a estos criterios de tolerancia y a la estabilidad atmosférica D (tabla 4.7) la unidad de destilación atmosférica DA-3 presenta riesgo reducible en la planta baja y primer piso para los niveles de daños equivalentes correspondientes al 1 y 50% de fatalidades. Esto se debe a que gran parte de los escenarios seleccionados en estos pisos, tal como se mencionó anteriormente, involucran a equipos dinámicos específicamente bombas centrífugas que poseen una frecuencia de falla alta y por ende incrementan la frecuencia total del evento, dando como resultado un riesgo que no es mínimo pero que puede ser reducido.

Para lograr reducir este riesgo deben evaluarse medidas individuales o combinaciones de medidas de ingeniería y/o administrativas que permitan la disminución de las frecuencias de ocurrencia y/o minimización de las consecuencias de los posibles eventos y aplicando un análisis costo-beneficio que fundamente la justificación económica de las propuestas planteadas a efectos de facilitar la toma de decisiones.

Para el caso del riesgo en el segundo piso de la unidad para el 1 y 50% de fatalidades y en todos los pisos para el 99% de fatalidades resulto mínimo lo cual implica que es tolerable y no es imperativo aplicar medidas de reducción del riesgo. No obstante, si se visualizan medidas obvias que contribuyan a reducir aún más el riesgo y la aplicación del análisis costo-beneficio favorece la implantación de tales medidas, las mismas deberían adoptarse.

En la tabla 4.8 se observa que para la estabilidad atmosférica F se obtienen como resultados para la planta baja y al 1 y 50% de fatalidades un nivel de riesgo reducible y la causa, de manera similar a la estabilidad D, es que la mayor parte de los escenarios seleccionados incluyen a bombas centrífugas. Para los demás pisos se obtuvo como resultado un riesgo mínimo lo que implica según los criterios establecidos por PDVSA que es tolerable.

Tabla 4.8. Niveles de riesgos individual (estabilidad atmosférica F).

Fatalidad	Piso	Frecuencia	Nivel
1%	Planta baja	2,04E-04	Reducible
	Primer piso	5,72E-05	Mínimo
	Segundo piso	3,47E-05	Mínimo
50%	Planta baja	1,06E-04	Reducible
	Primer piso	2,75E-05	Mínimo
	Segundo piso	1,32E-05	Mínimo
99%	Planta baja	1,14E-05	Mínimo
	Primer piso	1,03E-05	Mínimo
	Segundo piso	8,61E-06	Mínimo

Debido a que las longitudes de consecuencias no sobresalen de los límites de planta no fue necesario realizar el cálculo del nivel de riesgo social ya que los eventos que podrían llegar a ocurrir no alcanzarían a las poblaciones cercanas a dicha planta.

En las figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se pueden apreciar las curvas de consecuencias correspondientes al 1% de fatalidades de la unidad para las estabildades atmosféricas D y F respectivamente, pudiendo visualizar que esta unidad tiene el potencial de afectar áreas de proceso cercanas a la planta (planta de servicios industriales), así como también edificios de operaciones (bunker y sala de operadores), debido a las distancias que pueden alcanzar los distintos eventos peligrosos ocasionados por los diferentes escenarios de estudio. En el anexo J se encuentran las curvas de

consecuencias para el 50% y 99% de fatalidades y para ambas estabilidades atmosféricas D y F.

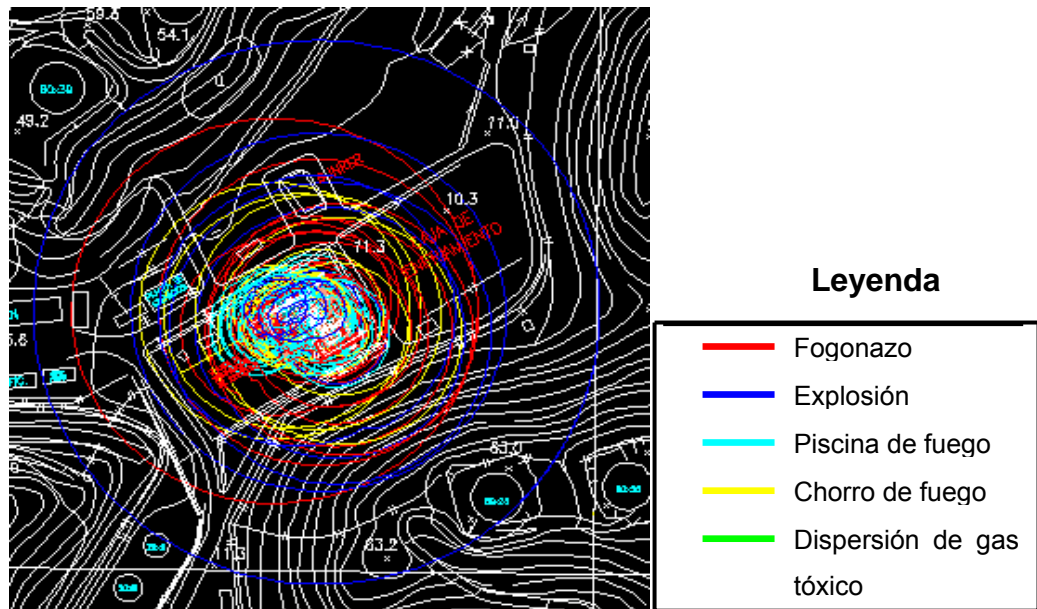


Figura 4.2. Curvas de consecuencias planta baja para 1% de fatalidades (estabilidad D).

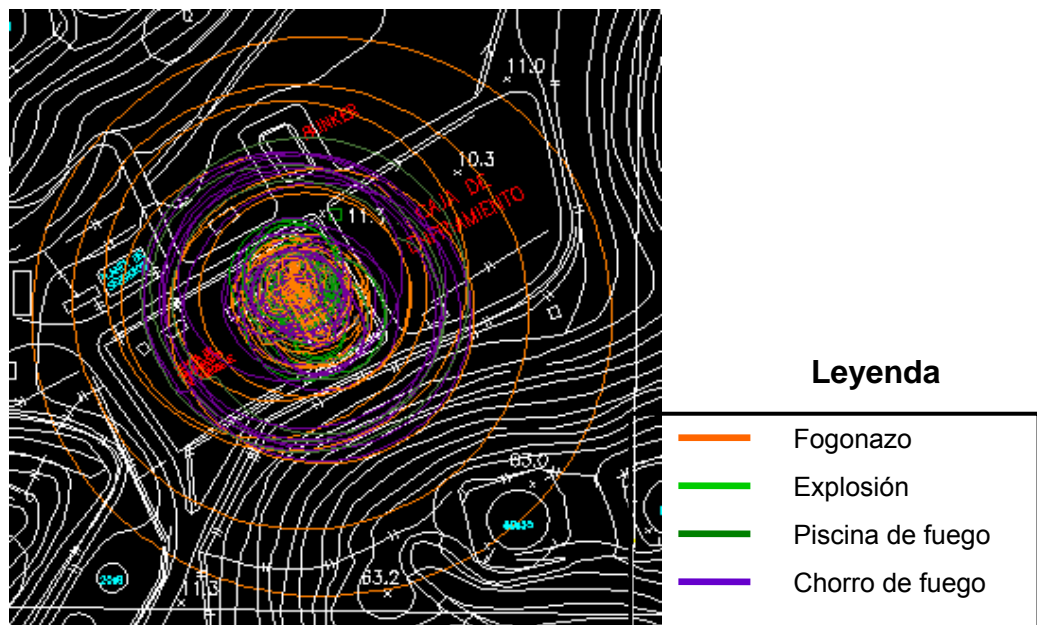


Figura 4.3. Curvas de consecuencias primer piso 1% de fatalidades (estabilidad D).

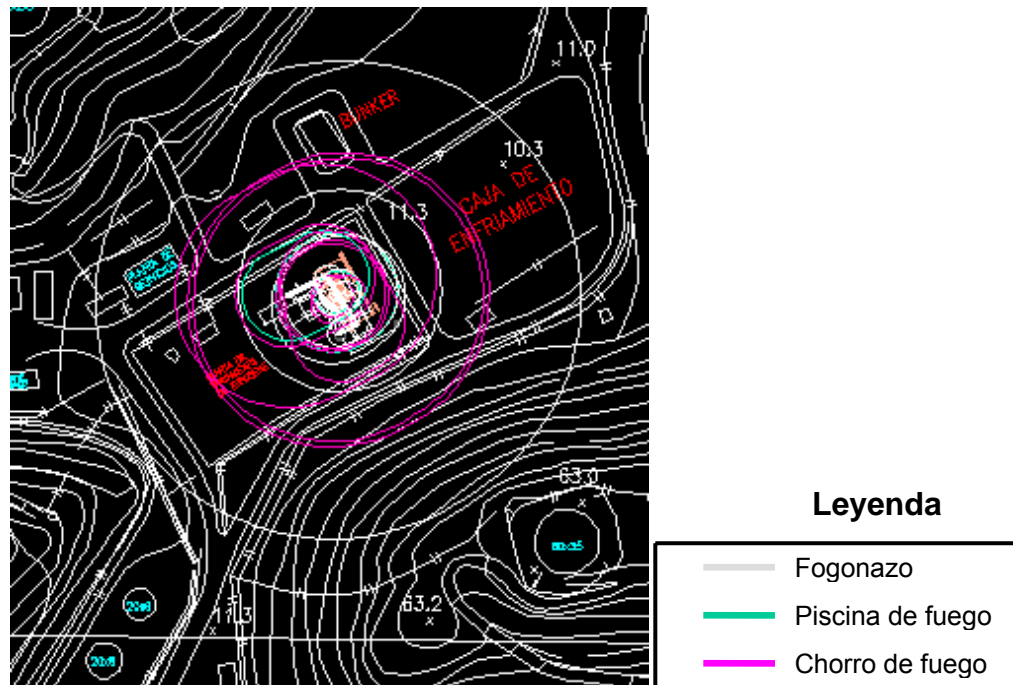


Figura 4.4. Curvas de consecuencias segundo piso 1% de fatalidades (estabilidad D).

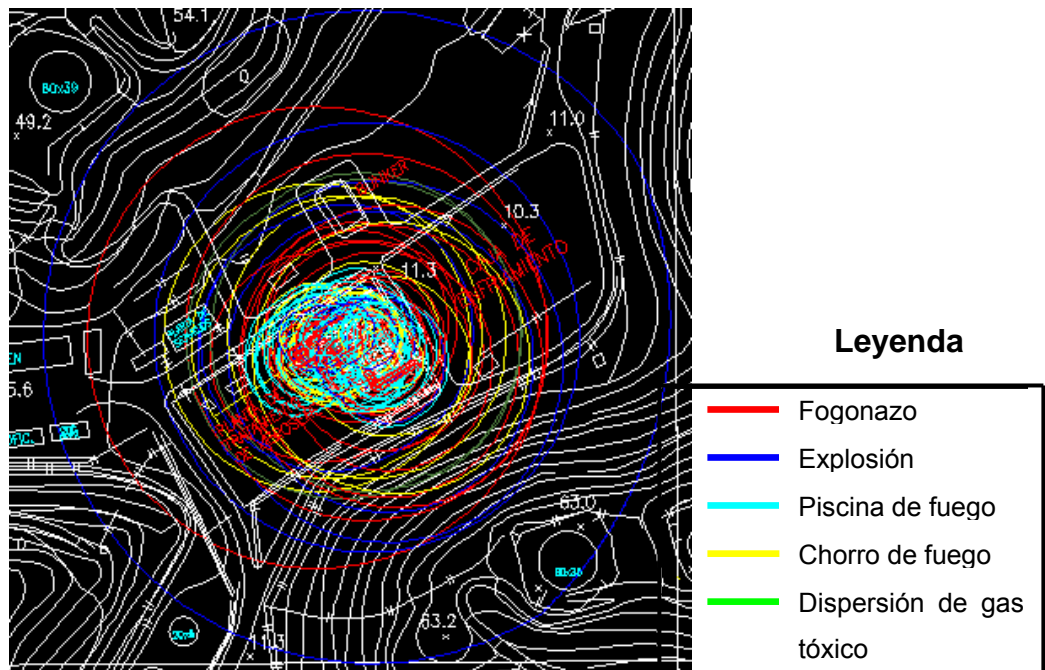


Figura 4.5. Curvas de consecuencias planta baja 1% de fatalidades (estabilidad F).

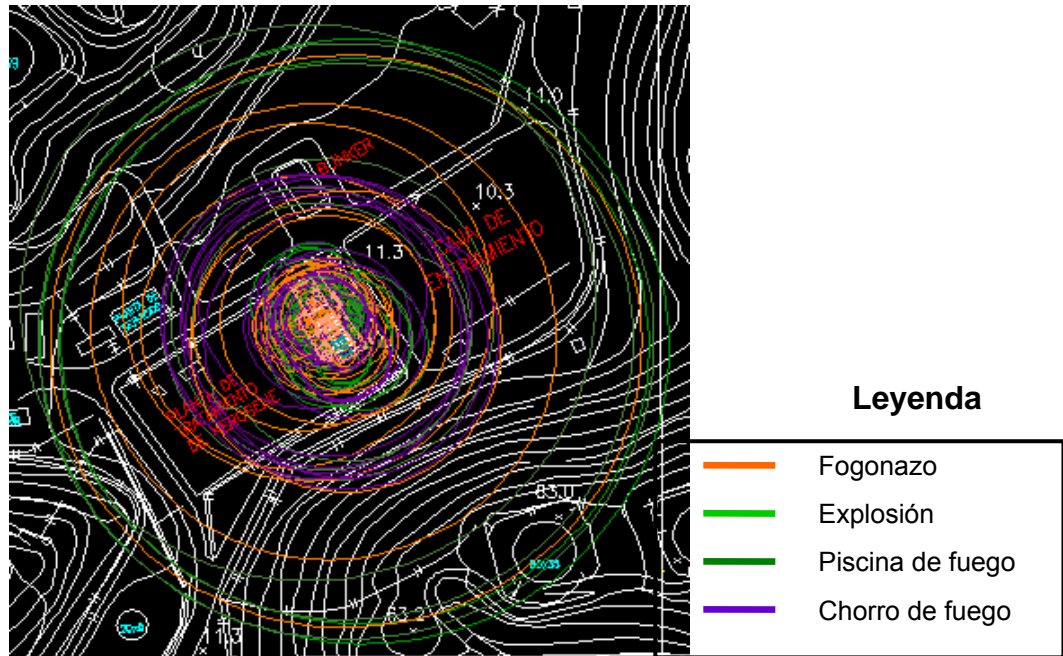


Figura 4.6. Curvas de consecuencias primer piso 1% de fatalidades
(estabilidad F).

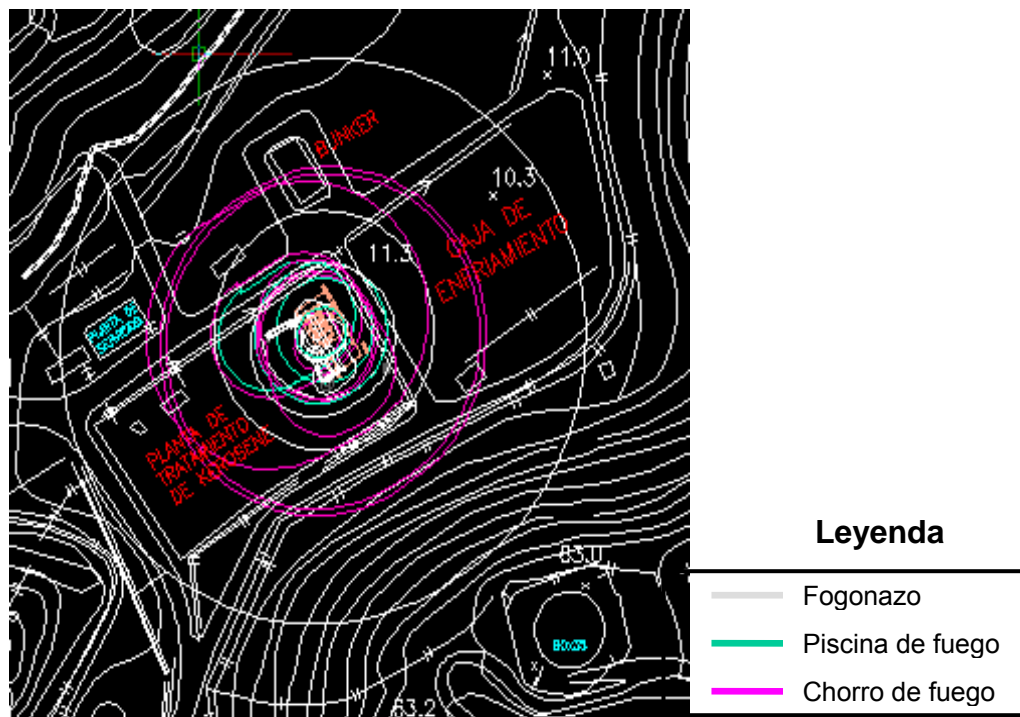


Figura 4.7. Curvas de consecuencias segundo piso 1% de fatalidades
(estabilidad F).

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran las curvas de riesgo individual para el 1% de fatalidad sobre la planta baja de la unidad DA-3 para las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente. En el anexo K se pueden observar las curvas de riesgo individual para los demás pisos correspondientes al 1% de fatalidad y para el 50 y 99% de fatalidad.

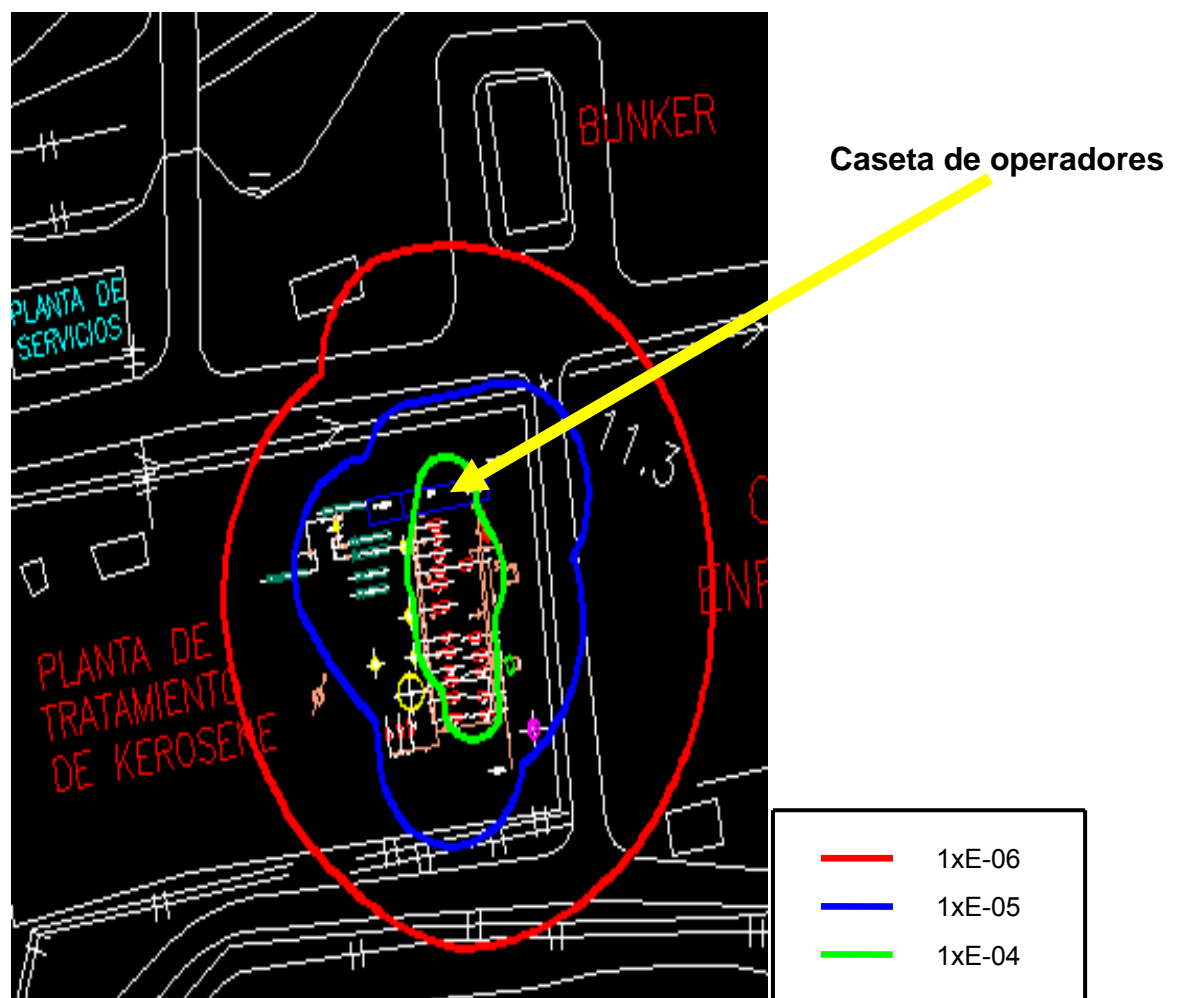


Figura 4.8. Curvas de riesgo individual planta baja 1% de fatalidades (estabilidad D).

Como se observa en la figura 4.8 el riesgo meta alcanzado en la planta baja fue 1×10^{-4} y como se indicó anteriormente es un riesgo reducible, ubicado en el centro de la planta específicamente en el pasillo de bombas abarcando a su vez la caseta de operadores, resultado que era esperado ya que las bombas son precisamente el equipo con la mayor frecuencia de falla dentro de la unidad, por lo que se recomienda reubicar dicha caseta en una zona más alejada para disminuir el riesgo que corren los operadores estando en dicha caseta.

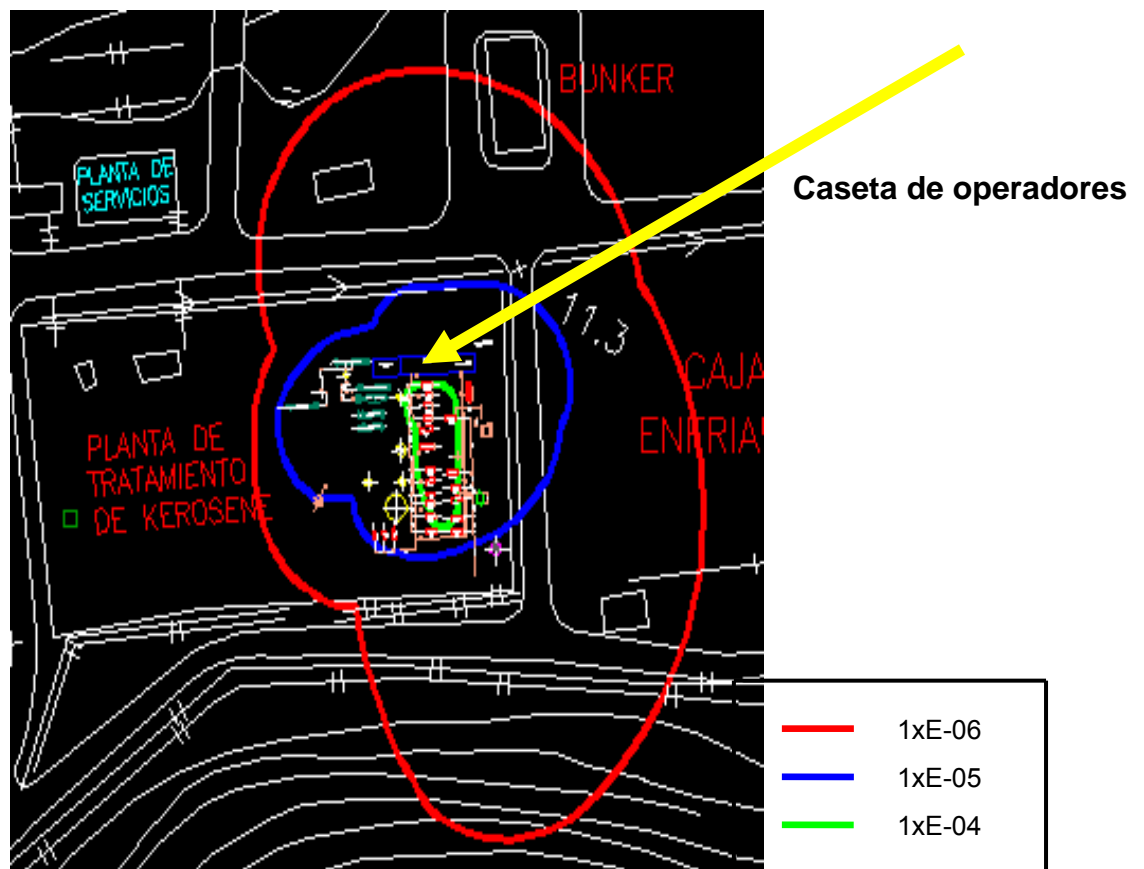


Figura 4.9. Curvas de riesgo individual planta baja 1% de fatalidades (estabilidad F).

La figura 4.9 es similar a la 4.8 debido a que el nivel de riesgo obtenido es reducible e igual a 1×10^{-4} ubicado en el centro de planta pero en este caso no alcanza la caseta de operadores pero aun así ésta está muy próxima a riesgos inminentes.

4.5 Evaluación del diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad destiladora atmosférica DA-3 mediante el uso de mejores prácticas de diseño

En la tabla 4.9 se puede observar la lista de chequeo realizada para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad de la planta, donde se muestran cada uno de los aspectos relevantes considerados para el análisis cuantitativo de riesgos.

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3.

Documentación requerida	Si	No	Observaciones
1. ¿Se dispone de los diagramas de flujo de proceso?	X		Versión desactualizada

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Documentación requerida	Si	No	Observaciones
2. ¿Se dispone de los diagramas de tubería e instrumentación?	X		Versión desactualizada
3. ¿Se dispone de un manual de operación?	X		
4. ¿Se dispone de la composición molar de las corrientes?	X		Suministrada por el laboratorio RPLC
5. ¿Se dispone del inventario de líquidos de los recipientes?	X		
6. ¿Se dispone de las hojas de datos de seguridad de las sustancias (MSDS)?	X		Suministradas en el portal de la RPLC
7. ¿Se dispone de los planos de clasificación eléctrica de áreas?	X		
8. ¿Se ha elaborado un estudio de riesgo previamente?	X		HAZOP
9. ¿Se dispone de informes de historial de accidentalidad de la planta?		X	
10. ¿Se dispone de informes de historial de fallas de la planta?	X		Si, pero con sólo 4 años de registros
11. ¿Se dispone de plan de emergencia y contingencia?	X		
12. ¿Se dispone de un procedimiento escrito para identificar y probar periódicamente las alarmas críticas contra fuego y/o gases tóxicos?		X	
Aislamiento	Si	No	Observaciones
1. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento para protección personal?		X	En zonas fueron retiradas en la parada mayor y no fueron colocadas
2. ¿Permanecerá el aislamiento en sitio cuando se le aplique un chorro de agua contra incendio a alta velocidad?	X		En algunas zonas existen deficiencias

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Aislamiento	Si	No	Observaciones
3. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a válvulas e instrumentos de medición y control?	X		Existen deficiencias
4. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a prueba de fuego en recipientes, equipos elevados o soportes de tubería?		X	
5. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a prueba de fuego u protección para conductos críticos como cables eléctricos y dispositivos de cierre remoto?		X	Las que existen estan rotas
6. ¿Se ha provisto de un adecuado aislamiento a faldas de equipos de proceso?		X	
7. ¿Se ha mantenido el aislamiento a prueba de fuego alejado de los recipientes aislados internamente?	X		
Pavimentación, drenajes y fundaciones	Si	No	Observaciones
1. ¿Está el piso totalmente pavimentado donde pueden producirse derrames de líquidos inflamables o peligrosos?	X		
2. ¿Está el pavimento inclinado para alejar y vaciar derrames que se pudieran acumular debajo de equipos y estructuras?	X		
3. ¿Puede el sistema de drenaje manejar la máxima rata de aplicación de agua contra incendio?	X		
4. ¿Están los drenajes completamente inundados, con el fin de evitar espacios de vapor donde pudiera producirse explosión?	X		

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Pavimentación, drenajes y fundaciones	Si	No	Observaciones
5. ¿Están las fundaciones y los equipos adecuadamente diseñadas para cualquier eventualidad de terremotos?		X	Un estudio realizado por la Universidad del Zulia revela que no
6. ¿Tiene el sistema de drenaje para tempestad y agua contra incendio de áreas de hidrocarburos, trampas para evitar que se viertan los hidrocarburos en propiedad ajena?	X		
Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
1. ¿Se ha provisto de adecuadas facilidades de drenaje de emergencia para cualquier líquido peligroso dentro del edificio, con el fin de evitar pozos de líquido ardiente dentro del piso horizontal de un edificio o estructura?	X		
2. ¿Se ha minimizado el uso de ventanas?. ¿Si existen ventanas están hechas de vidrio de seguridad?		X	
3. ¿Contribuyen los componentes del edificio a la combustión o liberación de materiales nocivos cuando está expuestos al fuego?		X	
4. ¿Están las plataformas y barandas adecuadamente diseñadas para evitar que la gente resbale en los mismos?	X		
5. ¿Tienen las puertas de emergencia de incendio fusibles pasadores de cierre?	X		
6. ¿Es la altura libre sobrecabeza adecuada en los pasillos y las áreas de trabajo?	X		

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
7. ¿Están las estructuras y los soportes aislados a prueba de fuego para evitar un colapso en caso de incendio	X		
8. ¿Proporcionan las plataformas suficiente espacio libre para operación y mantenimiento de equipos?	X		En general si pero hay zonas en donde el espacio es limitado
9. ¿Se ha considerado la colocación de paredes resistentes a la explosión para proteger el equipo y al personal en las áreas adyacentes?		X	El bunker si las posee, pero la caseta de operadores no y está ubicada dentro del área de proceso
10. ¿Se han evitado bolsillos de agua sin drenaje en miembros estructurales?		X	
11. ¿Están las salidas de ventilación ubicadas donde no crearán un problema?	X		
12. ¿Se han ubicado entradas de aire donde no le entrarán contaminantes?	X		
13. ¿Tiene cada edificio o estructura por lo menos dos salidas?	X		
14. ¿Tienen las puertas de salida sus aperturas hacia afuera?	X		
15. ¿Están las rutas de escape lo más lejos posible de los sitios próximos a derrames de tóxicos o incendios?		X	La ruta de escape de la caseta de operadores está muy cercana a los sitios mencionados
16. ¿Existen señales de dirección claras para las rutas de escape en cualquier área complicada?	X		
17. ¿Existe una adecuada iluminación de emergencia?		X	

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Edificios y estructuras	Si	No	Observaciones
18. ¿Están los dispositivos de parada de emergencia ubicados cerca de rutas de escape donde puedan ser alcanzados sin mucho peligro adicional en caso de emergencia?		X	
Riesgos eléctricos	Si	No	Observaciones
1. ¿Se han especificado los suministros de energía de emergencia adecuados?		X	
2. ¿Han sido protegidos los tendidos de cables contra fuego y explosión instalándolos por debajo de tierra en bandejas aisladas?	X		
3. ¿Están todos los sistemas de detección y alarma para emanaciones tóxicas o inflamables conectadas a los suministros de energía de emergencia?		X	
Protección contra incendios	Si	No	Observaciones
1. ¿Se suministra el agua contra incendio desde una fuente independiente y de adecuada capacidad?	X		Desde los tanques 101, 102, 103 y 104
2. ¿Son las bombas de agua contra incendio de tamaño adecuado? ¿Tienen fuentes de suministro de energía confiables?	X		
3. ¿Están los monitores e hidrantes ubicados a una distancia razonable de todo equipo de proceso, equipo de servicios y patios de tanques?	X		
4. ¿Existe un adecuado número de dispositivos de alarmas contra incendios y buen sistema de alarma de evacuación?		X	No existen alarmas contra incendios

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Protección contra incendios	Si	No	Observaciones
5. ¿Se le ha dado consideración adecuada a la necesidad de sistemas de espumas, sistemas de rociadores y de inundación, cortinas de vapor y de agua, y sistemas de dióxido de carbono y de químico seco?	X		
6. ¿Existen adecuadas paredes contra incendio?		X	
7. ¿Los materiales propuestos contra incendio son compatibles con todos los materiales de proceso?	X		
8. Se ha suministrado vapor de sofocamiento o nitrógeno para los calentadores de llama y para válvulas de seguridad que descargan los gases combustibles directamente a la atmósfera?	X		
Disposición en planta	Si	No	Observaciones
1. ¿Hay una adecuada separación entre los bloques de equipos?		X	
2. ¿Dónde no se pueda obtener adecuado espacio, se ha provisto de cortinas de vapor o de agua?	X		
3. ¿Son los bloques de equipos lo suficientemente pequeños para suministrar agua contra incendio?	X		
4. ¿Es el acceso adecuado para un mantenimiento futuro sencillo, y por lo tanto seguro?	X		Existen zonas donde no se cumple (área bombas)
5. ¿Están las áreas críticas para la operación de planta lo más lejos de las áreas de altos riesgos?	X		
6. ¿Existe adecuada provisión para el drenaje de líquidos inflamables?	X		

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Disposición en planta	Si	No	Observaciones
7. ¿Están todas las unidades peligrosas ubicadas a una distancia segura de la periferia del sitio?	X		· ·
8. ¿Están las áreas donde la gente se concentra ubicadas en la periferia de la planta y vientos arriba del material combustible?	X		
9. ¿Están los soportes de tubería (pipe racks) ubicados donde no interfieran o puedan ser dañados por grúas u otros vehículos?	X		
10. ¿Están la mayoría de los equipos ubicados en lo posible, cercanos a nivel de piso?		X	
11. ¿Están los equipos de protección contra incendio ubicados en un lugar seguro; pero a la vez en un sitio donde puedan ser movidos con facilidad a cualquier otro sitio?	X		· · · ·
12. ¿Está el estacionamiento ubicado en la periferia de la planta, donde el tráfico no tiene que pasar a través de las áreas de proceso?	X		
Hornos	Si	No	Observaciones
1. ¿Existe adecuada previsión para un corte o detección automática de combustible al haber falla de llama?	X		· ·
2. ¿Existen ciegos adecuados para mantenimiento?			
3. ¿Existen válvulas de retención o de bloqueo para evitar flujo en retroceso?			

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Recipientes	Si	No	Observaciones
1. ¿Hay una protección adecuada contra sobrepresión o vacío?	X		
2. ¿Tienen los manómetros e indicadores de nivel y los controladores una protección adecuada	X		
3. ¿Existen bocas de visita adecuadas para inspección, limpieza y mantenimiento, y para una adecuada evacuación de emergencia del personal?	X		
4. ¿Existen escaleras internas y agarraderas adecuadas, requeridas para el acceso de mantenimiento e inspección?	X		
Equipos rotativos	Si	No	Observaciones
1. ¿Están los equipos que manejan materiales inflamables ubicados en las afueras cuando sea posible?		X	Pasillo de bombas
2. ¿Se han hecho provisiones adecuadas para inspección y mantenimiento?	X		
3. ¿Se han instalado válvulas de bloqueo operadas remotamente donde grandes fugas pudieran ser peligrosas?		X	
4. ¿Se han instalado sellos mecánicos dobles en las bombas que manejan materiales inflamables o peligrosos?		X	
5. ¿Se han provisto de paros automáticos para las siguientes anomalías: baja presión de succión, excesiva temperatura de proceso, baja presión de aceite de sello, fuga o goteo de materiales inflamables y/o alta vibración del eje?		X	

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Tuberías	Si	No	Observaciones
1. ¿Están las válvulas de parada de emergencia ubicadas donde puedan ser utilizadas con seguridad si ocurre una emergencia?	X		Pero son de difícil manejo porque la mayoría están oxidadas
2. ¿Están los controladores y válvulas de control fácilmente accesibles para su mantenimiento?		X	
3. ¿Están las válvulas de seguridad o venteo que descargan a la atmósfera en dirección a las áreas de operación?		X	
4. ¿Pueden ser alcanzadas con facilidad todas las válvulas de emergencia y suiches?		X	
5. ¿Se ha elaborado un adecuado sistema de identificación para que las líneas puedan ser fácilmente identificadas en una emergencia?		X	
Detectores de gases inflamables/tóxicos	Si	No	Observaciones
1. ¿Existen detectores que permitan detectar gases o vapores inflamables/tóxicos?		X	
2. ¿Los detectores están instalados orientados hacia abajo sobre el equipo o área a proteger?		X	
3. ¿Están instalados alejados de posibles descargas de líquidos, a fin de evitar inmersión o contacto directo con los mismos?		X	
4. ¿El punto de instalación del detector es accesible para la calibración y mantenimiento?		X	
5. ¿Los detectores están incorporados en los programas de mantenimiento preventivo?		X	

Tabla 4.9. Lista de chequeo para la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad para el ACR de la unidad DA-3 (continuación).

Revestimiento contra incendio	Si	No	Observaciones
1. ¿Están adecuadamente protegidos los sopotes de tuberías?		X	
2. ¿Están adecuadamente protegidos las líneas de señales de instrumentación?		X	
3. ¿Están adecuadamente protegidos los soportes de equipos de combustión?		X	
4. ¿Están adecuadamente protegidos las bandejas de cables eléctricos?	X		
Otros	Si	No	Observaciones
1. ¿Existe una manga del viento? ¿Se encuentra en el punto más alto de la planta?	X		
2. ¿Existe estaciones de seguridad y duchas lava-ojos en las zonas peligrosas?	X		
3. ¿Todas las alarmas son audibles y visibles en el tablero de control		X	
4. ¿Existe alarma local y/o en la sala de control para alertar a los operadores de la unidad cuando se haya activado una ducha?		X	

Se pudo observar en la revisión de seguridad que la unidad posee desviaciones de acuerdo a lo establecido en las normas en que fue basada está evaluación. Con respecto a la documentación requerida para dicha evaluación se puede decir que se dispone de toda la información, pero la misma se encuentra en un estado muy disperso y algunas de ellas en versiones desactualizadas.

Con respecto al aislamiento existen muchas deficiencias debido a que en la parada de planta mayor del 2010 fueron retirados y no se colocaron nuevamente. Los que existen están rotos y no cumplen a cabalidad con la función para lo cual fueron diseñados.

La pavimentación, drenajes y fundaciones de la unidad presentan un estándar de acuerdo a las normas de seguridad en diseño, la única desviación que se encontró fueron las fundaciones de los equipos y estructuras para cualquier eventualidad de terremoto ya que en un estudio previo realizado por la Universidad del Zulia en el año 2007 llamado estudio de corrosión estructural de la unidad DA-3, se obtuvo que dichas fundaciones no serían resistentes a sismos debido principalmente al inadecuado diseño de los desagües, los cuales han permitido una mayor extensión del mojado continuo de los elementos y equipos, por el agua de mar que se dispersa en toda la extensión de los pisos superiores hasta los inferiores causando debilitamiento en las mismas.

Los edificios y estructuras poseen muchas desviaciones sobre todo en la caseta de operadores que está ubicada al final del pasillo de bombas ya que no cumple con las normas mínimas de seguridad que debería existir para el resguardo del personal que allí labora.

El sistema de protección contra incendio presenta desviaciones ya que la unidad no cuenta con alarmas que adviertan a los trabajadores la presencia de gases inflamables que originan riesgo de incendio.

En cuanto a la disposición en planta de los equipos se pueden observar desviaciones ya que la planta no tiene un espaciamiento adecuado según las normas consultadas previamente, así como también la mayoría de los

equipos no se encuentran a nivel de piso lo que incrementa el riesgo debido a que si un incendio se produce en la planta baja va a afectar en gran medida a los equipos a su alrededor y las llamas podrían hacer que colapse la estructura afectando los equipos que se encuentran en niveles superiores.

Todas estas desviaciones halladas en las visitas a planta incrementan los niveles de riesgos de la unidad considerando que estas desviaciones son desencadenantes que podrían aumentar la severidad de un evento. Es importante recordar que el riesgo no puede ser eliminado pero si disminuido hasta convertirlo en un riesgo tolerable tanto para los trabajadores como para el proceso en sí.

En el anexo L se puede observar un registro fotográfico de los hallazgos obtenidos en la revisión del diseño desde el punto de vista de seguridad.

4.6 Conclusiones

1. El evento con la mayor magnitud de consecuencia en la unidad DA-3 está representado por una explosión, inducida por un orificio de fuga equivalente a 6 pulgadas de diámetro y originada por el escenario PCR-8, alcanzando un radio de 190,3 y 200 metros para la estabilidad atmosférica D y F, respectivamente.
2. El evento de fognazo con la mayor magnitud de consecuencia está representado por el escenario RTT-5, con una distancia de 144,4 y 173,2 metros para el 1% de fatalidades en las estabilidades atmosféricas D y F, respectivamente.

3. El evento de piscina de fuego con la mayor magnitud de consecuencia está representado por el escenario NAF-4, con una distancia de 32,2 y 27,5 metros para el 1% de fatalidades en las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.
4. El evento de chorro de fuego con la mayor magnitud de consecuencia está representado por el escenario RTT-4, con una distancia de 119,4 y 122,9 metros para el 1% de fatalidades en las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.
5. El evento de dispersión de gas tóxico con la mayor magnitud de consecuencia está representado por el escenario AMO-1, con una distancia de 45,9 y 54,0 metros para el 1% de fatalidades en las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.
6. Las consecuencias de la unidad DA-3 tienen el potencial de afectar a la caseta de operadores, el bunker de control y a la planta de servicios industriales ubicadas en El Chaure.
7. El escenario GAS-2 representado por una piscina de fuego es el que se presenta con mayor frecuencia de ocurrencia provocado por un orificio de fuga equivalente a 1/4 de pulgada y originando una frecuencia total de $2,46E-04$ y $9,63E-05$ 1/año para las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.
8. El evento de fogonazo con mayor frecuencia de ocurrencia está representado por el escenario GAS-9 con una frecuencia total de $2,46E-04$ y $9,63E-05$ 1/año para las estabildades atmosféricas D y F, respectivamente.

9. El evento de explosión con mayor frecuencia de ocurrencia está representado por el escenario PCR-8 con una frecuencia total de $2,76E-06$ y $1,08E-07$ 1/año para las estabilidades atmosféricas D y F, respectivamente.
10. El evento chorro de fuego con mayor frecuencia de ocurrencia está representado por el escenario PCR-1 con una frecuencia total de $5,85E-05$ y $2,99E-06$ 1/año para las estabilidades atmosféricas D y F, respectivamente.
11. El nivel de riesgo individual del primer piso de la unidad DA-3 para el 1% de fatalidades y para la estabilidad atmosférica D es reducible, mientras que para la estabilidad atmosférica F es mínimo.
12. La unidad DA-3 no contribuye al nivel de riesgo social en la refinería Puerto La Cruz.
13. La documentación requerida para elaborar un análisis cuantitativo de riesgos se encuentra muy dispersa y desactualizada.
14. Existen deficiencias en los aislamientos para protección personal, para conservar el calor dentro de la unidad y no existen revestimientos contra incendio para proteger a los equipos.
15. Las fundaciones de la unidad podrían no soportar y ceder ante un terremoto.
16. No existen alarmas contra incendio, ni detectores de gases inflamables y/o tóxicos.

17. No hay un adecuado espaciamiento entre equipos.
18. La caseta de operadores no cumple con las medidas mínimas de seguridad.

4.7 Recomendaciones

1. Mantener el programa de inspecciones detalladas del estado físico y operacional de todos los equipos de la unidad destiladora atmosférica DA-3, en especial aquellos involucrados en los escenarios que presentaron las mayores frecuencias de ocurrencia y las mayores consecuencias, para de ésta manera prevenir cualquier posible fuga que pueda originar un evento.
2. Reubicar la caseta de operadores, ya que esta se encuentra dentro del área de planta y no cumple con las medidas básicas de seguridad.
3. Acondicionar e implantar sistemas fijos de protección contra incendio de aquellos equipos que manejen altos inventarios.
4. Revestir contra incendios los soportes de tuberías, equipos y señales de instrumentación.
5. Instalar detectores de gases inflamables/tóxicos que permitan detectar la presencia de gases o vapores inflamables/tóxicos.
6. Instalar sistemas de alarmas visibles y audibles en la unidad.

7. Tomar en cuenta en estudios posteriores la aplicación de medidas de reducción de riesgo en la unidad, para el caso riesgo reducible.
8. Divulgar este estudio de modo de facilitar el conocimiento del riesgo de las instalaciones a todo personal que labora en la empresa.
9. Retomar el empleo de la base de datos en la cual se compila información básica, media y detallada de las unidades de proceso de refinería Puerto La Cruz, que abarcan aspectos mecánicos, operacionales, de composiciones de corrientes, y de variables de proceso, para mitigar la gran dispersión de información que existe actualmente en la refinería, puesto que de ésta manera se optimizarían los tiempos de realización de estudios, proyectos y evaluaciones que van en pro de las mejoras y desarrollo del complejo refinador.
10. Realizar actualizaciones de los planos de tubería e instrumentación de la unidad DA-3.
11. Realizar actualizaciones de los plot-plants de la unidad destiladora atmosférica DA-3.
12. Actualizar y difundir los planes de desalojos y de emergencia para el ataque y control de los eventos que puedan llevarse a cabo en la planta.
13. Instalar cortinas de agua en las zonas donde no exista un adecuado espaciamiento entre equipos.

BIBLIOGRAFÍA

- American Institute of Chemical Engineers (AIChE) “**Guidelines for chemical process quantitative risk analysis**”. New York (1989).
- AP Photo/Ted S. Warren, Chorro de fuego en Tesoro Corp. Refinery, Imagen en línea [última revisión 9 de enero de 2011], http://www.nola.com/news/index.ssf/2010/04/4_dead_3_hurt_in_blast_fire_at.html
- Araque, K. y Luna, H. “**Análisis cuantitativo de riesgo de la planta de Diesel – Unidad 45**”. Documento Técnico, Refinería PLC, Venezuela (2007).
- Arias, R. “**Manual de ingeniería de riesgos, criterios para el análisis cuantitativo de riesgos**”. PDVSA N° IR-S-02. Versión 2. Volumen I. Caracas, Venezuela (2004).
- Crowl, D. y Louvar, F. “**Chemical process safety**”. Prentice Hall. Segunda edición. USA (1990).
- Epstein, M. y Fauske, H. “**Emergency relief vent sizing for fire emergencies involving liquid-filled atmospheric storage vessels**”. Illinois, USA (1987).
- Gutiérrez, H. y Zambrano, N. “**Análisis de riesgos de los procesos de la unidad de destilación atmosférica 2**”. Documento Técnico, Refinería PLC, Venezuela (1999).

- Moreno, J. y Ramírez, R. **“Manual de información de seguridad de los procesos de la unidad de destilación atmosférica DA-3 de la refinería Puerto La Cruz”**. Puerto La Cruz, Venezuela (2001).
- National fire protection association (NFPA) **“The authority on fire, electrical, and building safety”**. USA (1986).
- PDVSA **“Libro de la refinería”**. Gerencia General de refinería, Puerto la Cruz (2006).
- Suárez, M. **“Análisis cuantitativo de riesgos de los procesos en la planta despojadora de aguas agrias, unidad 46”**. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela (2007).
- Thermal poolfire test and sandia nacional laboratorios, prueba de piscina de fuego de 30 minutos, imagen en línea (última revisión 10 enero 2011) http://www.sandia.gov/tp/SAFE_RAM/GALLERY.HTM
- Vieira, M. **“Análisis cuantitativo de riesgos de los procesos de la unidad de hidrotreatmento de nafta, unidad 19”**. Documento Técnico, Refinería PLC, Venezuela (2007).
- Wordpress, VCE en Refinería de Texas 2005, Imagen en línea [última revisión 9 de enero de 2011], <http://listverse.com/2010/06/01/top-10-recent-american-industrial-disasters/>

- Zambrano, N. **“Manual de ingeniería de control de riesgos y seguridad en diseño”**. Asesores en riesgos de procesos C.A. (ARPCA). Caracas, Venezuela (2007).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	Estimación de los niveles de riesgo de proceso en la unidad destiladora atmosférica n° 3 de la refinería Puerto La Cruz, conforme a la metodología análisis cuantitativo de riesgos.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
María Eugenia Pérez Prieto	CVLAC: 18.127.957 E MAIL: mariaeugeniapp@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

_____ Peligros _____

_____ Frecuencias _____

_____ Consecuencias _____

_____ Simulador_Canary _____

_____ Curvas_de_riesgos _____

_____ Eventos _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	
	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis cuantitativo de riesgos a la unidad DA-3 de la refinería Puerto La Cruz, Se procedió a identificar los escenarios que pudieran generar eventos peligrosos asociados a fugas de sustancias inflamables, combustibles y/o tóxicas dentro de la planta. Una vez definidos los escenarios se establecieron las consecuencias para conocer los eventos y magnitudes que pudieran presentarse de acuerdo a dos estabilidades atmosféricas seleccionadas previamente, logrando obtener como evento más severo el de explosión representado por el escenario PCR-8. Posteriormente se realizó el cálculo de frecuencias de ocurrencia de cada uno de los eventos obtenidos suponiendo que los eventos iniciadores han ocurrido, dando como resultado que el evento más frecuente es una piscina de fuego representada por el escenario GAS-2. Luego se determinaron los niveles de riesgos de la planta obteniendo que el nivel de riesgo individual del primer piso de la unidad DA-3 para el 1% de fatalidades es reducible para la estabilidad D y mínimo para la estabilidad F. Adicionalmente se evaluó el diseño desde el punto de vista de seguridad de la unidad.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Chaparro Luis	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	12.206.443			
	E_MAIL	chaparrolm@pdvsa.com			
	E_MAIL				
Moreno Yuvi	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	12.980.821			
	E_MAIL	ycmoreno@nalco.com			
	E_MAIL				
Patiño Rayda	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	11.833.699			
	E_MAIL	raydapatino@gmail.com			
	E_MAIL				
Arturo Rodulfo	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.300.709			
	E_MAIL	rodulfo99@hotmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	05	12
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Estimación de los niveles.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero _ químico _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado _____

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química _____

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado _____

“Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo _____ respectivo, _____ quien lo participará el Consejo Universitario”

María Eugenia Pérez Prieto
AUTOR

Yuvi Moreno
TUTOR

Rodulfo Arturo
JURADO

Rayda Patiño
JURADO

Yraima Salas
POR LA SUBCOMISION DE TESIS