

**ANÁLISIS DE RIESGO TECNOLÓGICO DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO
U-200 ASOCIADO A LOS EVENTOS AMENAZANTES EN LA
TORRE ATMOSFÉRICA T-201 DE LA GERENCIA DEL COMPLEJO DE
BARRANCABERMEJA –ECOPETROL S.A.**

DIANA CAROLINA LÓPEZ CÁRDENAS
Ing. Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Bucaramanga, 2006**

**ANÁLISIS DE RIESGO TECNOLÓGICO DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO
U-200 ASOCIADO A LOS EVENTOS AMENAZANTES EN LA
TORRE ATMOSFÉRICA T-201 DE LA GERENCIA DEL COMPLEJO DE
BARRANCABERMEJA –ECOPETROL S.A.**

DIANA CAROLINA LÓPEZ CÁRDENAS
Ing. Química

Monografía realizada para optar al título de Especialista en Ingeniería Ambiental

Directora
ANA MARÍA BETANCUR HERNÁNDEZ
Ingeniera Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Bucaramanga, 2006**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES DEL RIESGO	3
1.1. DEFINICIONES BÁSICAS.....	3
1.2. DESCRIPCIÓN DE EVENTOS AMENAZANTES	5
1.2.1. Fugas: Escapes y Derrames	6
1.2.2. Incendios	6
1.2.2.1. Piscina de Fuego (Pool Fire).....	6
1.2.2.2. Chorro de Fuego (Jet Fire).....	6
1.2.2.3. Llamarada (Flash Fire).....	7
1.2.3. Explosiones	7
1.2.3.1. Explosiones iniciadoras de fugas.	7
1.2.3.2. Explosiones como consecuencia de fugas.....	9
1.3. MARCO LEGISLATIVO.....	9
2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION DE INTERES: UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO U-200 DE LA GERENCIA DEL COMPLEJO DE BARRANCABERMEJA – ECOPETROL S.A.	11
2.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE DESTILACIÓN	11

2.1.1. Sección de Destilación Atmosférica	11
2.1.2. Sección de Destilación al Vacío	13
2.2. DESTILACIÓN EN LA UNIDAD U-200.....	13
2.2.1. Secciones Principales de la U-200.....	14
2.2.1.1. Pre calentamiento I.	14
2.2.1.2. Desalado y Neutralización.....	15
2.2.1.3. Pre calentamiento II.	15
2.2.1.4. Calentamiento en H-201 y H-202.....	15
2.2.1.5. Destilación Atmosférica.....	15
2.2.1.6. Destilación al Vacío en T-205.	16
2.2.1.7. Enfriamiento.	16
2.2.2. Productos de la Unidad U-200	16
2.2.2.1. Productos Atmosféricos.	16
2.2.2.2. Productos de Vacío.....	16
2.2.3. Caracterización Torre Atmosférica T-201.....	17
2.2.3.1. Proceso.	17
2.2.3.2. Dimensiones y Materiales.	18
2.2.3.3. Componentes de la Torre Atmosférica T-201.	20
2.4. MATERIA PRIMA DE LA DESTILACIÓN: EL PETRÓLEO CRUDO.....	22

2.4.1. Crudo Carga a la Unidad U-200	22
3. METODOLOGÍA: ESTRUCTURA GENERAL DEL ANÁLISIS DE RIESGO TECNOLÓGICO	23
3.1. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	23
3.2. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.....	24
3.2.1. Eventos Iniciantes	25
3.2.1.1. Identificación y Selección de Causas	25
3.2.1.2. Identificación de los Eventos Iniciantes.....	26
3.2.1.3. Estimación de Ocurrencia de Eventos Iniciantes.	27
3.2.2. Identificación y Selección de los Eventos Amenazantes.....	27
3.2.2.1. Identificación de Eventos Amenazantes.....	27
3.2.2.2. Estimación de Ocurrencia de Eventos Amenazantes.	27
3.3. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
4.1. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	29
4.1.1. Escogencia del Subsistema	29
4.1.1.1. Importancia del Subsistema dentro de la Unidad U-200.....	30
4.1.1.2. Cantidad manejada de Carga en el Subsistema.....	30
4.1.1.3. Mecanismos de daño presentes por la operación típica de la unidad.....	30

4.2. BASE DE DATOS: REGISTROS DEL PORTAL DE INCIDENTES	31
4.3. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.....	32
4.3.1. Identificación de la Amenaza Tecnológica	32
4.3.2. Eventos Iniciantes	34
4.3.2.1. Identificación y Selección de Causas.....	34
4.3.2.2. Identificación de los Eventos Iniciantes.....	40
4.3.2.3. Estimación de Ocurrencia de Eventos Iniciantes.	51
4.3.3. Eventos Amenazantes.....	52
4.3.3.1. Identificación y Selección de Eventos Amenazantes.	52
4.3.3.2. Estimación de Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes.....	55
4.3.3.3. Identificación de Parámetros de Frecuencia para una Instalación.....	58
4.4. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS	59
4.4.1. Caracterización de escenarios a modelar.	59
4.4.2. Determinación de las zonas de afectación.....	62
4.4.2.1. Zonas de Afectación por Incendio.	62
4.4.2.2. Zonas de Afectación por Lllamarada.....	62
4.4.3. Determinación de Corredores de Afectación.....	65
4.4.4. Estimación de porcentaje de daño o Vulnerabilidad.	68
4.4.4.1. Daño sobre Personas (Modelos de Vulnerabilidad PROBIT).....	68

4.4.4.2. Daño a equipos (Pérdidas económicas).....	72
4.4.4.3. Personal en las Unidades de Topping.....	83
4.4.5. Calificación y Selección de las Categorías de Consecuencias de Interés	84
4.5. VALORACIÓN FINAL DEL RIESGO	86
4.5.1. Matriz RAM.....	86
4.5.2. Matriz Investigación.....	90
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	102

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Explosiones Inicadoras en Sistemas Cerrados (CVCE).....	8
Figura 2. Explosiones Inicadoras en Sistemas Semiabiertos	9
Figura 4. Torres de Destilación de U-200 (de izq. a derecha T-201, T-204 y T-205).....	14
Figura 5. Diagrama de instrumentación de la torre atmosférica T-201	19
Figura 6. Estructura del Análisis de Riesgos	24
Figura 7. Esquema del Análisis y Evaluación de la Amenaza.....	25
Figura 8. Mecanismos de Daño probables en una Unidad de Destilación de Crudo	31
Figura 9. Matriz típica de Selección de Causas	39
Figura 10. Matriz de Selección de Causas encontradas en las Unidades Topping de GCB	40
Figura 11. EI1: Liberación de Hidrocarburos Livianos (fase gaseosa).....	42
Figura 12. EI2: Escape de Hidrocarburos (fase vapor)	43
Figura 13. EI3: Derrame de Hidrocarburos (fase líquida).....	45
Figura 14. EI4: Sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas/tanques de recibo de producto	46
Figura 15. EI5: Liberación de energía	47
Figura 16. EI6: Derrame de Hidrocarburo al río Magdalena.....	48
Figura 17. EI7: Liberación de gases tóxicos como el Ácido Sulfhídrico (H ₂ S) y el Monóxido de Carbono (CO)	49

Figura 18. El8: Liberación de compuestos Corrosivos como Ácido Clorhídrico HCl.....	50
Figura 19. Proporción de Eventos Iniciantes detectados en la Refinería de Barrancabermeja.....	51
Figura 20. Árbol de Eventos para un Derrame de Hidrocarburo en Fase Líquida dentro de las Instalaciones de la Unidad de Destilación	53
Figura 21. Árbol de Eventos para un Escape de Hidrocarburo en Fase Gaseosa dentro de las Instalaciones de la Unidad de Destilación	54
Figura 22. Eventos Amenazantes desarrollados en las Unidades de Destilación de la Refinería de Barrancabermeja	57
Figura 23. Proporción de eventos amenazantes desarrollados a partir de eventos iniciantes identificados en las unidades de Topping.	58
Figura 24. Zonas de Afectación por Incendio.....	64
Figura 25. Zonas de Afectación por Incendio de Nube (Llamarada).....	65
Figura 26. Código de Colores para las Zonas de Afectación por Radiación Térmica.	68
Figura 27. Radiación Térmica versus Distancia de Afectación de los eventos de incendio de chorro y piscina de la Torre T-201.....	70
Figura 28. Plano de ubicación de equipos en la unidad de Destilación de Crudo U-200.	75
Figura 29. Plano resumido de las Unidades de Topping en la Refinería de Barrancabermeja.....	77
Figura 30. Matriz RAM básica de Valoración del Riesgo	87
Figura 31. Valoración Final del Riesgo en la U-200 a través de la Matriz RAM.....	89
Figura 32. Valoración Final del Riesgo en la U-200 a través de la Matriz Investigación..	94

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Líneas de Proceso de la Torre Atmosférica T-201	21
Tabla 2. Modos de Falla usados en la identificación y selección de causas	26
Tabla 3. Sustancias Amenaza en las Unidades de Destilación de Crudo de de la Refinería de Barrancabermeja	33
Tabla 4. Mínimo y Máximo de Frecuencia de Ocurrencia de Causas	36
Tabla 5. Intervalos de Calificación de Frecuencia de Ocurrencia Anual de Causas	36
Tabla 6. Identificación y Selección de Causas en las Unidades de Destilación	37
Tabla 7. Frecuencia de Ocurrencia de los Eventos Iniciantes Identificados en las Unidades de Topping de GCB.....	41
Tabla 8. Proporción de Derrames y Escapes de los fluidos identificados como Amenaza en las unidades de Topping	44
Tabla 9. Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes Asociados a los Eventos Iniciantes identificados en las Unidades de Topping de GCB.....	56
Tabla 10. Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes para una Planta de Destilación de Crudo.	58
Tabla 11. Calificación de Frecuencia de Ocurrencia de los Eventos Amenazantes identificados en las Unidades de Topping.....	59
Tabla 12. Escenarios Modelados en PHAST para determinación de Distancias de Afectación por Eventos Amenazantes en la Torre T-201.....	61
Tabla 13. Zonas de Afectación por Radiación Térmica	63

Tabla 14. Zonas de Afectación por Lllamarada	65
Tabla 15. Corredores de protección Modelados en PHAST para los Escenarios críticos de la Torre T-201	67
Tabla 16. Resumen de los eventos Amenazantes con mayor Distancia de Afectación modelados en PHAST	69
Tabla 17. Intensidades de Radiación Térmica determinadas por el Modelo PROBIT para probabilidades de afectación del 90, 50 y 1% de población expuesta.....	69
Tabla 18. Correlaciones de Radiación Térmica vs Distancia de Afectación para los eventos de Chorro.....	70
Tabla 19. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Nafta por descarga de 1 pulg en la succión	71
Tabla 20. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Nafta por escape de 1 pulg en la descarga.....	71
Tabla 21. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Piscina de CRED por derrame de 0.5 pulg en la descarga	71
Tabla 22. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Diesel por escape de 0.5 pulg en la descarga	72
Tabla 23. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Diesel por escape de 1 pulg en la descarga	72
Tabla 24. Distancias de Afectación usadas para determinar las pérdidas económicas en la U-200.....	72
Tabla 25. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de equipos generada por Chorro de Fuego de Nafta en la Succión.....	76

Tabla 26. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de bombas generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido	79
Tabla 27. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de Intecambiadores de Calor generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido	80
Tabla 28. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de tanques generada Incendio de Piscina de Crudo Reducido	81
Tabla 29. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de Torres generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido	82
Tabla 30. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de hornos generado por Incendio de Piscina de Crudo Reducido	82
Tabla 31. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de equipos generada por Chorro de Fuego de Diesel en la descarga 0.5”	83
Tabla 32. Personal en las Unidades de Topping	84
Tabla 33. Consecuencias Seleccionadas en el Análisis de la Unidad de Destilación de Crudo U-200	85
Tabla 35. Probabilidad de las Consecuencias para la Valoración con la Matriz RAM	88
Tabla 36. Valoraciones Parciales de Riesgo en la Matriz RAM.....	88
Tabla 37. Resumen de las Fatalidades y las Pérdidas Económicas por los Eventos Amenazantes Críticos de la U-200.....	91
Tabla 38. Calificación de las consecuencias para la Valoración con la Matriz Investigación	92
Tabla 39. Probabilidad de las Consecuencias para la Valoración con la Matriz Investigación	92

Tabla 40. Valoraciones Parciales de Riesgo en la Matriz Investigación.....93

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. COMBUSTIBLES PRODUCIDOS EN COPETROL A BASE DE PRODUCTOS ATMOSFÉRICOS DE LAS UNIDADES DE DESTILACIÓN DE CRUDO	102
ANEXO 2. INDICATIVOS DE INCIDENCIA	113
ANEXO 3. METODOLOGÍA PROBIT	114
ANEXO 4. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE BOMBAS E INTERCAMBIADORES DE CALOR	117
ANEXO 5. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE TORRES DE DESTILACIÓN	118
ANEXO 6. DEFINICIÓN DE GRAVEDAD EN CONSECUENCIA EN AMBIENTE E IMAGEN	121
ANEXO 7. INTERPRETACIÓN DEL RIESGO SEGÚN LA VALORACIÓN RAM ..	122

RESUMEN

TÍTULO: Análisis de Riesgo Tecnológico de la unidad de destilación de crudo U-200 asociado a los eventos amenazantes en la Torre Atmosférica T-201 de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja –ECOPETROL S.A.*

AUTOR: Diana Carolina López Cárdenas.**

PALABRAS CLAVES: Riesgo Tecnológico, Unidad de Destilación de Crudo, ECOPETROL S.A, Eventos Amenazantes, Torre de Destilación Atmosférica, Consecuencias

RESUMEN:

La producción de sustancias químicas y otras actividades industriales se realizan por lo general en gran escala y requieren la aplicación de procesos tecnológicos complejos cuyo desarrollo se ha visto acompañado por un potencial creciente para provocar daños severos a las personas, las instalaciones y al ambiente; este potencial se ha denominado riesgo tecnológico.

El objetivo principal de esta monografía fue la realización del análisis de Riesgo Tecnológico de una unidad de destilación de crudo perteneciente a ECOPETROL S.A., para lo cual se valoró el riesgo de los eventos amenazantes con las consecuencias posibles más elevadas dentro de la planta como lo fueron los incendios de Nafta, Diesel y Crudo Reducido, los cuales fueron determinados de las evidencias objetivas que se recolectaron del portal de incidentes de la Gerencia del complejo de Barrancabermeja para el departamento de Refinación y específicamente en las 5 unidades de Crudo. Las consecuencias de interés que se analizaron en esta monografía reunieron la afectación a personas y las pérdidas económicas por daño a equipos.

Se identificaron los eventos con el potencial de causar serias consecuencias como escapes y derrames de materiales inflamables, derrame de hidrocarburos al río Magdalena y emisión de gases a la atmósfera principalmente. En este análisis se contó con los reportes de incidentes para el periodo comprendido entre Septiembre 19 de 2003 y Septiembre 19 de 2005. También se determinaron las principales causas que generaron eventos iniciantes dentro de las topping y se modelaron los eventos amenazantes identificados sobre el sistema de estudio para determinar las distancias de afectación por incendio usando el programa PHAST Professional 6.2.1.

Finalmente, se realizó una valoración cualitativa del riesgo usando la Matriz RAM y una valoración semicuantitativa usando la valoración de pérdidas económicas y afectación sobre personas determinadas en esta investigación.

* Trabajo de grado para obtener el título de Especialista en Ingeniería Ambiental

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Especialización en Ingeniería Ambiental. Directora: Ana María Betancur

ABSTRACT

TITLE: Technological Risk Analysis of Crude Distillation Unit U-200 associated to the threatening events in the Atmospheric Tower T-201 of Complex Management of Barrancabermeja - ECOPETROL S.A.*

AUTHOR: Diana Carolina López Cárdenas**

KEY WORDS: Technological Risk, Crude Distillation Unit, ECOPETROL S.A. Threatening Events, Atmospheric Distillation Tower, Consequences, PHAST Professional

ABSTRACT:

Chemical substance production and other industrial activities are made generally in great scale and require the application of complex technological processes whose development has been accompanied by an increasing potential to cause severe damages to the people, the installations and to the atmosphere; this potential has denominated technological risk.

The principal objective of this monograph was the accomplishment of Technological Risk Analysis of a Crude Distillation Unit pertaining to ECOPETROL S.A., for which the risk of the threatening events with more possible consequences within the plant was valued such the Gasoline, Reduced Crude, Diesel fires which were determined of the objective evidences collected of incidents vestibule of complex Management of Barrancabermeja for Refinement department and in the 5 Crude Units. The consequences of interest that were analyzed in this monograph reunited to the people affectation and the economic losses by damage to equipment.

The events with the potential to cause serious consequences were identified such inflammable materials spills, hydrocarbons spill to the Magdalena river and gas discharge to the atmosphere mainly. In this analysis it was counted on the reports of incidents for the period between September 19 of 2003 and September 19 of 2005. Also the main causes were determined that generated initial events within topping and threatening events identified were modeled on the study system to determine fire affectation ranges using PHAST Professional 6.2.1. program.

Finally, this investigation made a qualitative valuation of the risk using the RAM Matrix and a semiquantitative valuation using the economic losses valuation and people affectation determined in this job.

* Job to obtain the degree of Environmental Engineer Specialist

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Especialización en Ingeniería Ambiental. Directora: Ana María Betancur

INTRODUCCIÓN

La producción de sustancias químicas y otras actividades industriales se realizan por lo general en gran escala y requieren la aplicación de procesos tecnológicos complejos cuyo desarrollo se ha visto acompañado por un potencial creciente para provocar daños severos -y, a veces, persistentes- a las personas y al ambiente; este potencial se ha denominado riesgo tecnológico.

La necesidad de comprender los mecanismos implícitos en el riesgo tecnológico y de establecer normas para su control, así como de mitigar los efectos más adversos de los accidentes, llevó a la creación de una disciplina llamada análisis de riesgo. Este análisis de riesgo comprende el conocimiento y la valoración de la naturaleza y las características de las situaciones peligrosas que puedan presentarse en el ámbito de las operaciones dentro de una instalación (planta industrial) y es el primer paso para el diseño, estructuración y puesta en funcionamiento de un plan de contingencia, contribuyendo de igual manera a la búsqueda racional de la seguridad a través del conocimiento de los riesgos y sus efectos, con el fin de disminuir su posibilidad de ocurrencia y de luchar contra la magnitud de sus consecuencias.

La Unidad de destilación de crudo U-200 es una planta industrial que pertenece al departamento de refinación de crudo de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A.; realiza en sus instalaciones el proceso principal de separación física de las fracciones del petróleo crudo mediante destilación utilizando condiciones altas de temperatura y manejando sustancias peligrosas como hidrocarburos, amoníaco, soda cáustica, monóxido de carbono los cuales combinados generan riesgo para el medio circundante.

Con base en lo anterior es importante realizar un análisis de los eventos peligrosos que allí se puedan desencadenar con el fin de dimensionar las consecuencias de dichos eventos con posibilidad de ocurrir, y apoyar posteriormente la estructuración del plan de contingencia. Para este análisis se seleccionó la torre de destilación atmosférica principal denominada dentro de la refinería T-201.

El objetivo principal de esta monografía fue la realización del análisis de Riesgo Tecnológico de la unidad de destilación de crudo U-200 de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja perteneciente a ECOPETROL S.A. asociado a los eventos peligrosos presentes en la torre atmosférica T-201, para lo cual se valoró el riesgo de los eventos amenazantes que según la investigación presentarían las consecuencias más elevadas dentro de la planta como lo fueron los incendios de chorro de fuego de Nafta y Diesel y el incendio por piscina de fuego por derrame de Crudo Reducido. Estos escenarios se seleccionaron de acuerdo a las evidencias objetivas que se recolectaron del portal de incidentes de la Gerencia del complejo de Barrancabermeja para el departamento de Refinación y específicamente en las 5 unidades de Crudo. Las consecuencias de interés que se analizaron en esta monografía reunieron la afectación a personas y las pérdidas económicas por daño a equipos, encontrándose que el evento con crudo reducido podría afectar toda la unidad de destilación U-200 si llegara a presentarse.

Previamente a estos resultados se identificaron los eventos con el potencial de causar serias consecuencias como escapes y derrames de materiales inflamables, derrame de hidrocarburos al río Magdalena y emisión de gases a la atmósfera principalmente. En este análisis se contó con los reportes de incidentes para el periodo comprendido entre Septiembre 19 de 2003 y Septiembre 19 de 2005.

También se determinaron las principales causas que generan eventos iniciantes dentro de las topping encontrándose que las fallas en bombas, en instrumentos de medición y control, así como irregularidades en el compresor se exhiben como las principales promotoras de eventos dentro de este estudio.

Se modelaron los eventos amenazantes identificados sobre el sistema de estudio para determinar las distancias de afectación por incendio ya que el evento de explosión no se concibió en la investigación por no tener condiciones favorables para su desencadenamiento. Una vez modelados los corredores de protección el siguiente paso fue determinar los efectos en personas y equipos, para lo cual se usó la metodología PROBIT para vulnerabilidad de personas y cálculo de costo por reposición de equipos teniendo en cuenta cuáles equipos sufrían impacto por estar dentro de las distancias de afectación para la intensidad de radiación térmica con mayores consecuencias (37.5 KW/m^2) sobre las categorías de interés (vidas y dinero).

Finalmente, como ya se mencionó se realizó una valoración cualitativa del riesgo usando la Matriz RAM y una valoración semicuantitativa usando la valoración de pérdidas económicas y afectación sobre persona determinada en esta investigación y se encontró que la valoración máxima de los eventos amenazantes evaluados fue media debido a la baja ocurrencia de las consecuencias estimadas, sin embargo el hecho de determinar grandes consecuencias da una voz de alerta para tratar de reducir los posibles elementos causantes de los eventos catastróficos, ya que el hecho de no haberse presentado no significa que no se esté propenso a vivirse.

1. GENERALIDADES DEL RIESGO

La tendencia mundial y nacional de integrar las áreas de salud, seguridad, medio ambiente e higiene industrial y calidad, ha venido promoviendo el uso del análisis y evaluación del riesgo como una herramienta que permite concretar la destinación de los recursos técnicos y económicos en las acciones de prevención, protección y reacción de esas áreas mencionadas.

El análisis del riesgo se convierte cada vez más, en la mejor ayuda para la planeación de emergencias, para el conocimiento y estimación sobre los eventos amenazantes al negocio o proceso productivo, así mismo en la ayuda a identificar y conocer los eventos amenazantes que ofrece el proceso industrial o negocio para las personas, los bienes y el medio ambiente. Se podría afirmar que el mayor aporte del análisis de riesgo radica en poder pasar de los términos meramente cualitativos y subjetivos de las consecuencias de cualquier tipo de evento amenazante sobre unos elementos vulnerables, a obtener valoraciones cuantitativas de pérdidas ambientales, y humanas entre otras, dentro del contexto de cada instalación del sistema productivo social, económico y político de cada región y del país en general [6].

Desde hace decenios se han desarrollado y utilizado métodos para análisis y evaluación de los diferentes tipos de riesgos que se derivan de distintas actividades humanas. Es razonable pensar que hay riesgos inevitables, aunque se puedan disminuir y otros que se asumen como contrapartida a los beneficios que se obtienen de la naturaleza y de la actividad humana. Por eso se habla de “Factores que determinan la utilidad de la actividad industrial” cuando se menciona “riesgo aceptado para personas, bienes y servicios” como un costo social de la actividad industrial. La misma consideración valdría para viajar en cualquier medio de transporte, comer, caminar por la calle, por poner ejemplos de actividades muy habituales.

En general, para afrontar de manera objetiva el tema presente se debe admitir una realidad, cualquier actividad natural o artificial comporta un riesgo inherente y por tanto requiere la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad para su análisis de riesgo. Los métodos para análisis y evaluación de riesgos son una herramienta valiosa para abordar las acciones mencionadas de forma racional, científica y técnica. [7]

1.1. DEFINICIONES BÁSICAS

Existen varias definiciones de riesgo y asociadas a este las de: amenaza, peligro, vulnerabilidad y consecuencia, dependiendo de los países y escuelas de formación. A continuación se consignan algunas de las definiciones involucradas en este estudio como base para la investigación.

A. Amenaza

Condición física, química o natural con el potencial de causar consecuencias no deseables o daños serios sobre la población, la propiedad o el medio ambiente en general. Se expresa en términos de la probabilidad de ocurrencia del evento peligroso dentro de un lapso específico de tiempo y localizado en un área determinada. (Ejm.: producto líquido inflamable, gasolina, propano) [1]

Otra definición para amenaza [3] podría ser, la de un fenómeno natural o creado por el hombre que puede causar daño físico, pérdidas económicas o poner en peligro la vida humana y bienestar si ocurre en un área donde hay asentamientos humanos o en un sector agrícola o donde hay actividad industrial. Se debe tomar nota, sin embargo, que en el campo de la ingeniería, el término se usa en un sentido matemático más específico, para significar la probabilidad del suceso dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área específica de un fenómeno en particular potencialmente dañino y de una intensidad y gravedad determinada.

B. Amenaza creada por el hombre [3]

Condición que puede tener consecuencias desastrosas para una sociedad. Deriva de procesos tecnológicos, actividades humanas con el medio ambiente, o relaciones dentro o entre las comunidades.

Las amenazas naturales y las amenazas socio -naturales se pueden considerar del medio ambiente hacia la Instalación/Proceso; por otro lado, las antrópicas son de la Instalación/Proceso hacia el Medio Ambiente.

C. Evento Iniciante [1]

Pérdida de material o energía contenida en un recipiente.

D. Evento Amenazante

Corresponde al suceso final del desarrollo de la amenaza. (Ejm.: incendio del derrame del producto líquido inflamable). El derrame de hidrocarburos es un evento iniciante y a su vez un evento amenazante por su capacidad de contaminar el medio ambiente.

E. Escenario de Evento Amenazante

Localización o área física con condiciones ambientales para la ocurrencia de un evento amenazante. La caracterización del escenario comprende la ubicación geográfica y el desarrollo del evento.

F. Accidente

Un evento amenazante inevitable (intencionado o no intencionado) que cause daño a personas y/o bienes y/o medio ambiente.

G. Vulnerabilidad

Identificación y evaluación en el sistema y área de influencia, de los elementos físicos y biológicos que pueden ser afectados, cómo pueden ser afectados y en cuánto se ven afectados por una o varias amenazas. La determinación de la vulnerabilidad se puede expresar en términos de probabilidad sobre una escala de

“no daño” a “pérdida total”. Ejemplo: de una población ubicada en el punto (x,y) pueden morir el 20% resultado de una explosión.

H. Riesgo

Resultado de la evaluación combinada de la probabilidad de la amenaza y la probabilidad de la vulnerabilidad para un sistema, expresado mediante un número de personas afectadas (muertes y/o heridos) o pérdidas económicas por daños a bienes y al medio ambiente, esperados durante un intervalo de tiempo determinado.

La relación entre la amenaza y la vulnerabilidad se puede expresar de diversas formas [2]:

- Como la resultante de la relación entre amenaza y vulnerabilidad:

$$R = A * V \quad (1.1)$$

Si la amenaza es la probabilidad de que un evento peligroso ocurra, y la vulnerabilidad representa la fragilidad que se tenga para soportar o enfrentar esa amenaza, el riesgo es la probabilidad de que un evento determinado pueda afectar con una intensidad determinada y en un momento determinado.

I. Análisis del Riesgo.

Conjunto de procedimientos cualitativos y cuantitativos, desarrollados en forma sistemática, que permite la identificación y valoración de las amenazas que pueden materializarse a partir de los productos peligrosos manejados en un proyecto ó instalación, y la correspondiente vulnerabilidad de los elementos del área de influencia que potencialmente podrían verse afectados.

El proceso de tomar decisiones para manejar el riesgo y la implementación, estudio, aplicación y evaluación es gobernado por la idea de “el costo de salvar una vida” principalmente, y seguidamente, por la eficacia de los programas regulatorios en términos de costo, número de muertes prevenidas y bienes protegidos.

1.2. DESCRIPCIÓN DE EVENTOS AMENAZANTES

Las industrias químicas y petroleras se caracterizan por tener pocos accidentes pero, cuando se producen, de severidad (alcances y efectos) elevados. Ello da lugar a que los aspectos de seguridad tengan una importancia y sean objeto de una intensa atención en las actividades de diseño, proyecto, operación y mantenimiento de las plantas pertenecientes a dichas industrias. La secuencia accidental, que se considerará con detalle más adelante y que se puede dar de manera incompleta o total, suele ser:

- Emisión: derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos. Puede generar efectos tóxicos, incendios y/o explosiones según la naturaleza de las sustancias emitidas.
- Incendio: combustión (de varias formas) de los fluidos contenidos o emitidos, generando radiación térmica dañina cuando aquellos son inflamables.

- Explosión: anterior (por ejemplo de aparatos) a la emisión o posterior (por aceleración de la combustión) al incendio, generando ondas de presión o de sobrepresión que son dañinas. La explosión puede también dar lugar a la propagación de proyectiles.

Tal conjunto de accidentes puede afectar a las personas, a los bienes y al medio ambiente, tanto dentro como fuera de los límites de la planta cuando estos tienen origen.

1.2.1. Fugas: Escapes y Derrames

Uno de los orígenes más frecuentes de los accidentes son las fugas de sustancias en forma de escapes (gases y vapores) y derrames (líquidos). Tales fugas pueden evolucionar en accidentes dependiendo de diferentes factores como condiciones (presión, temperatura, cantidad), estado físico del fluido fugado, naturaleza química (inflamabilidad, toxicidad), y tipo de sistema de contención (equipo cerrado o abierto) en el que se origina la fuga.

1.2.2. Incendios

Los incendios son reacciones de oxidación de materias combustibles, generalmente con aire como comburente. Los efectos de estos accidentes son: calor (generalmente radiante) que produce daños de por sí y porque puede propagar la cadena accidental, humos sofocantes y/o tóxicos, onda explosiva de sobrepresión cuando se dan ciertas condiciones de aceleración de la velocidad de reacción y/o de contención y puede propagar la cadena accidental.

En las instalaciones petroleras los incendios pueden ocurrir de varias maneras que dependen de la naturaleza (propiedades físicas y químicas) y de la disposición del combustible, además del tipo de proceso que se desarrolle pues cierta operación dará origen a algún o algunos eventos amenazantes pero no todos los registrados en la literatura, por tanto en los numerales siguientes se registran los eventos que se pueden presentar en una unidad de destilación de crudo específicamente en una torre de destilación atmosférica.

1.2.2.1. Piscina de Fuego (Pool Fire). Se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta (no presurizada). La piscina de fuego ocurre posterior al derrame de producto, una vez se produce una rotura de una línea que transfiere un fluido líquido. Por el efecto de la evaporación instantánea del producto se puede originar una nube inflamable que puede entrar en ignición y posteriormente ocurrir el incendio del producto que permanece esparcido sobre la superficie. Las manifestaciones de este tipo de incendio suelen ser la emisión de calor radiante y la de humos.

1.2.2.2. Chorro de Fuego (Jet Fire). Se presenta cuando una fuga continua del gas, se “prende” cerca del punto de la fuga y sus efectos se manifiestan por la radiación térmica incesante. Esta fuga localizada de gases o vapores (inflamables) se puede dar a través de perforaciones, bridas, empaques, uniones de tuberías, etc. La zona afectada depende de la velocidad y del área de descarga del gas, orientación y dirección del chorro y condiciones meteorológicas predominantes en el

momento del evento. Este tipo de incendio tiene un peligro relativamente bajo en si mismo (se deberá cortar la fuente de presión y caudal que origina la fuga y proceder a la extinción), pero si el dardo afecta a equipo colindante, puede dar lugar a otros accidentes más graves.

La ocurrencia del chorro de fuego está sujeta a la existencia de fuentes de ignición en el área, inmediatamente después de que se presente el escape ó debido a un incremento de la temperatura por encima de la temperatura de autoignición del fluido escapado.

1.2.2.3. Lllamarada (Flash Fire). La llamarada corresponde a la ignición repentina de la nube de vapores en un sitio alejado del escape del fluido. Generalmente el fenómeno es modelado considerando el criterio de que la nube entra en ignición a la distancia, en la dirección del viento predominante, donde se alcanza la concentración del límite inferior de inflamabilidad medio (LII/2). El rango de concentración para la existencia de condiciones inflamables hace referencia a los volúmenes de la mezcla gas-aire adecuados, para que en presencia de una fuente de ignición se genere una reacción de combustión. Adicionalmente, dentro del área cubierta no deben existir posibles fuentes de ignición ó puntos calientes, para evitar la ocurrencia del “flash fire”.

Para que el fenómeno de “flash fire” genere ondas de presión apreciables, debe existir una masa de producto mayor a 1000 kg en el momento que la chispa entra en contacto.

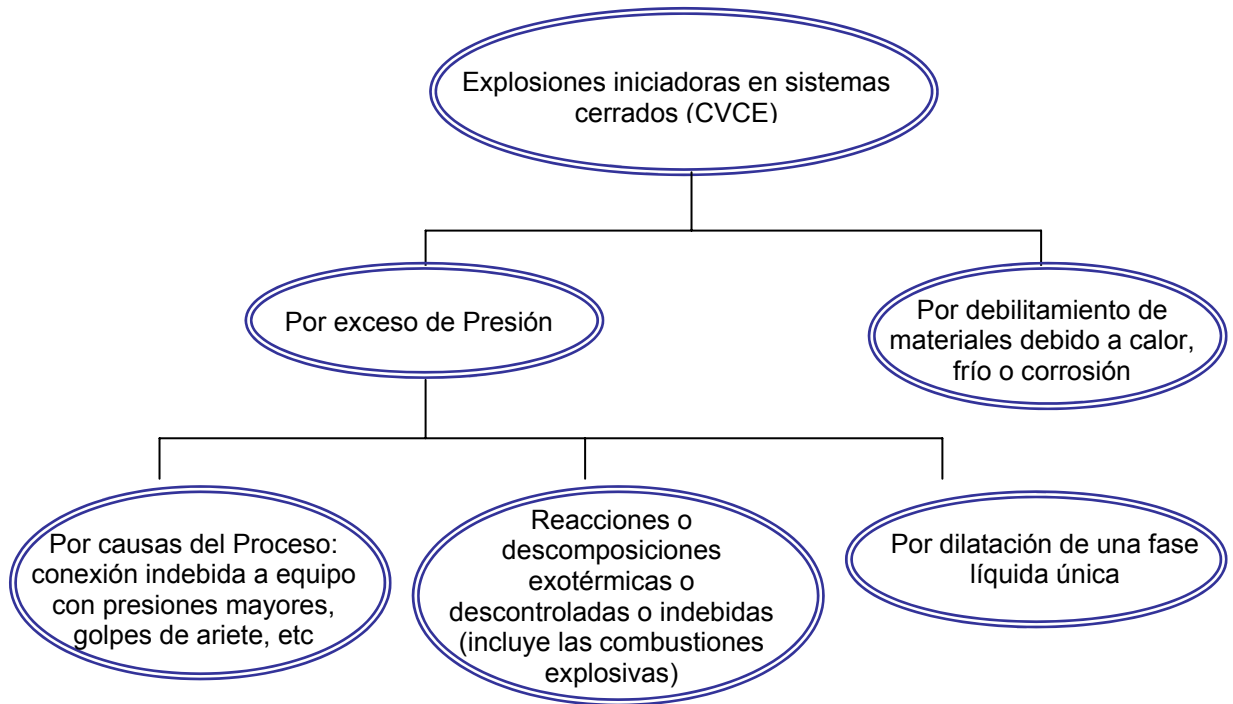
1.2.3. Explosiones

Son fenómenos caracterizados por el desarrollo de una presión (dentro de sistemas cerrados) o de una onda de sobrepresión (en espacios abiertos) que dan lugar a daños mecánicos. Según su origen y naturaleza las explosiones pueden estar en el inicio de una fuga (con consecuencias tóxicas y/o incendiarias) o deberse a la evolución de una combustión autoacelerada hacia la detonación (propagación supersónica). Los párrafos que siguen están limitados a las explosiones que suele afectar a instalaciones petroleras: en aparatos, recipientes y tuberías de gases y vapores.

1.2.3.1. Explosiones iniciadoras de fugas. Como se ha dicho, son las que dan lugar a una fuga iniciando así una cadena accidental que puede continuar con emisión tóxica, incendio y otras explosiones. Se pueden clasificar según se den en sistemas cerrados (CVCE=*confined vapor cloud explosion*) o en sistemas semiabiertos.

A. Explosiones iniciadoras en sistemas cerrados (CVCE).

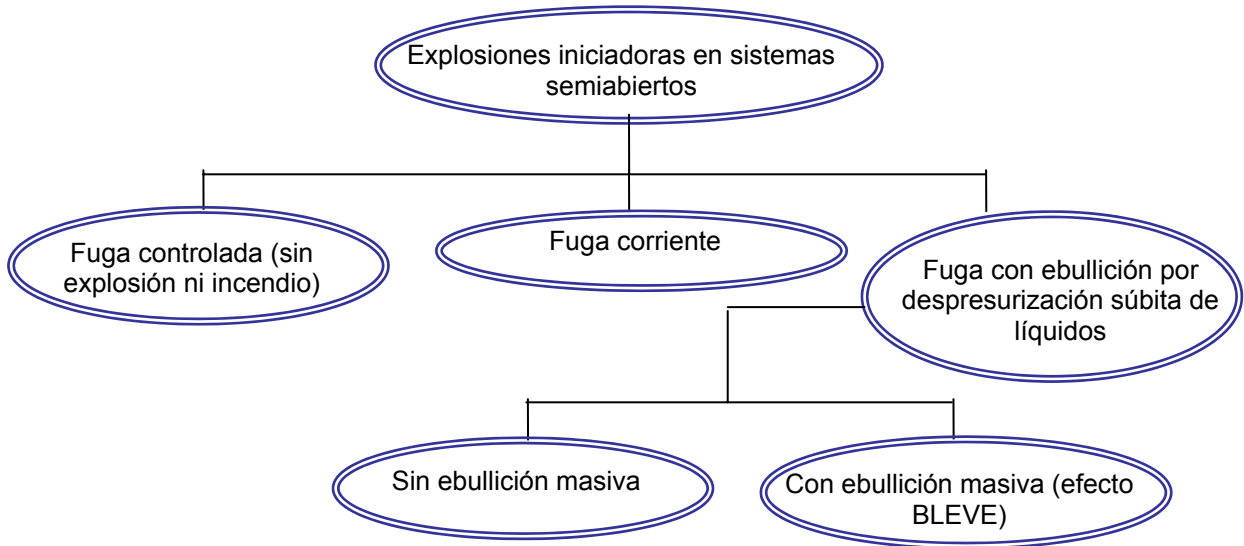
Figura 1. Explosiones Iniciadoras en Sistemas Cerrados (CVCE)



B. Explosiones Iniciadoras en Sistemas Semiabiertos

La apertura parcial de sistemas cerrados, pasándolos a la condición de semiabiertos, ocurre cuando se produce un orificio (por impacto de un proyectil, por apertura de un dispositivo de alivio –válvula de seguridad o disco de ruptura, etc.-), o una grieta (por fallo del material, como efecto de un impacto, choque o calor de incendio exterior). En algunos casos se produce entonces una fuga corriente de fluido a presión o una fuga controlada (por ejemplo: recogida a un colector y enviada para su tratamiento o destrucción). Los sistemas que contienen líquido/vapor a temperatura superior a la que corresponde al equilibrio entre dichas fases a la presión atmosférica son un caso frecuente de fuga con ebullición en las industrias ya que manejan recipientes para almacenamiento y proceso de gases licuados de todo tipo (GLP), líquidos calientes en reactores y hornos (crudo vaporizado), agua en determinadas secciones de las calderas de vapor, etc. Ver Figura 2.

Figura 2. Explosiones Iniciadoras en Sistemas Semiabiertos



C. Explosión de los Vapores en Expansión de un Líquido en Ebullición (BLEVE).

Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

Se presenta cuando un líquido combustible en un recipiente a presión, se calienta por efecto externo (ejm. incendio) generando vapores calientes, los cuales presionan el recipiente que los confina, hasta cuando éste falla por exceso de presión ó por fatiga térmica en la zona de vapores. El resultado puede ser una explosión violenta y devastadora, según los diferentes volúmenes de combustible involucrado. De acuerdo con los reportes registrados en la literatura [6] sobre accidentes catastróficos, el fenómeno de BLEVE ha tenido ocurrencia en mayor grado en los almacenamientos de LNG (gas natural licuado), GLP y propileno.

1.2.3.2. Explosiones como consecuencia de fugas.

En estos casos, una parte de la energía de la combustión se manifiesta en forma de energía mecánica asociando al fuego una onda de sobrepresión.

A. Explosión de Nube de Gas no Confinada (UVCE).

Unconfined Vapor Cloud Explosion.

La explosión de la nube de gas no confinada se puede presentar posterior a la rotura de una línea con escape de una masa suficiente de gas¹, con ignición a cierta distancia del punto de fuga. La explosión de gas no confinada produce una sobrepresión, la cual depende del tamaño de la nube y las propiedades químicas del producto.

1.3. MARCO LEGISLATIVO

¹Mayor a 1000 kg. Según la curva "Probability of Explosion" generada por Prugh, una nube de gas de masa 1000 kg tiene una probabilidad de explosión no confinada de 1%.

El interés y la necesidad de este estudio, además de la importancia de prevenir accidentes, se ve sustentado por razones legislativas como el Decreto 619 de 2000 (Plan de ordenamiento territorial) el cual define en su artículo 86 la obligatoriedad de los análisis de riesgos para toda actividad industrial. El artículo especifica: "Todas las entidades públicas y privadas que ejecuten obras de gran magnitud que tengan a su cargo el manejo de redes de infraestructura o que desarrollen actividades industriales o de cualquier naturaleza que generen amenazas de origen tecnológico, así como las que específicamente determine la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - DPAE deberán realizar análisis de riesgos que contemplen y determinen la probabilidad de ocurrencia de desastres y contar con los respectivos planes de emergencia y contingencia. Dichos planes deberán contener como mínimo las medidas de prevención y mitigación y todas aquellas que deban tomarse para la atención de emergencias, indicando los recursos técnicos y humanos necesarios para su implantación y el esquema de coordinación a adoptar entre las entidades y organismos llamados a intervenir" [8].

Obedeciendo a lo anterior y recordando que la importancia del análisis de riesgo provino de las experiencias y el conocimiento de países del extranjero es lógico pensar que este tipo de trabajos ya se ha realizado alrededor del mundo. Un ejemplo muy representativo y bien difundido es el de las Centrales Nucleares [4] debido a la gran peligrosidad de las actividades que realizan. Por otra parte, en Colombia y específicamente en la Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL S.A. hasta este momento se han realizado investigaciones en las unidades de Aromáticos, de Ruptura Catalítica, de Parafinas y en la Planta de Etileno entre otras instalaciones de la refinería. Sin embargo, en las unidades de destilación (Topping) este proceso no se ha realizado, por lo cual esta investigación pretende aportar directamente en este aspecto que impactará en el diseño y estructuración del plan de contingencia para este tipo de plantas.

2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION DE INTERES: UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO U-200 DE LA GERENCIA DEL COMPLEJO DE BARRANCABERMEJA –ECOPETROL S.A.

2.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE DESTILACIÓN

El petróleo crudo se separa físicamente, mediante fraccionamiento en torres de destilación atmosféricas y de vacío, en grupos de moléculas de hidrocarburos con diferentes intervalos de temperaturas de ebullición, denominados “fracciones”.

El crudo está compuesto por hidrocarburos de diferentes rangos de ebullición, desde metano hasta asfalto. Los hidrocarburos livianos (metano a butano), la gasolina y los destilados medios (Jet, Queroseno, Diesel y Gasóleo Liviano), son fraccionados en la sección atmosférica. En la sección al vacío, se obtienen las fracciones que tienen un punto de ebullición superior a la temperatura a la cual se empieza a presentar craqueo térmico (650-700 °F). Este craqueo se minimiza reduciendo la presión parcial del hidrocarburo, con lo cual, a su vez, se disminuyen los puntos de ebullición de las fracciones. Para ello es necesario mantener ésta sección al vacío y diluir los vapores de hidrocarburo con vapor de agua, el cual actúa como un gas inerte. Además de los hidrocarburos, el crudo también presenta en su composición pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno (0-5%) dependiendo de su origen.

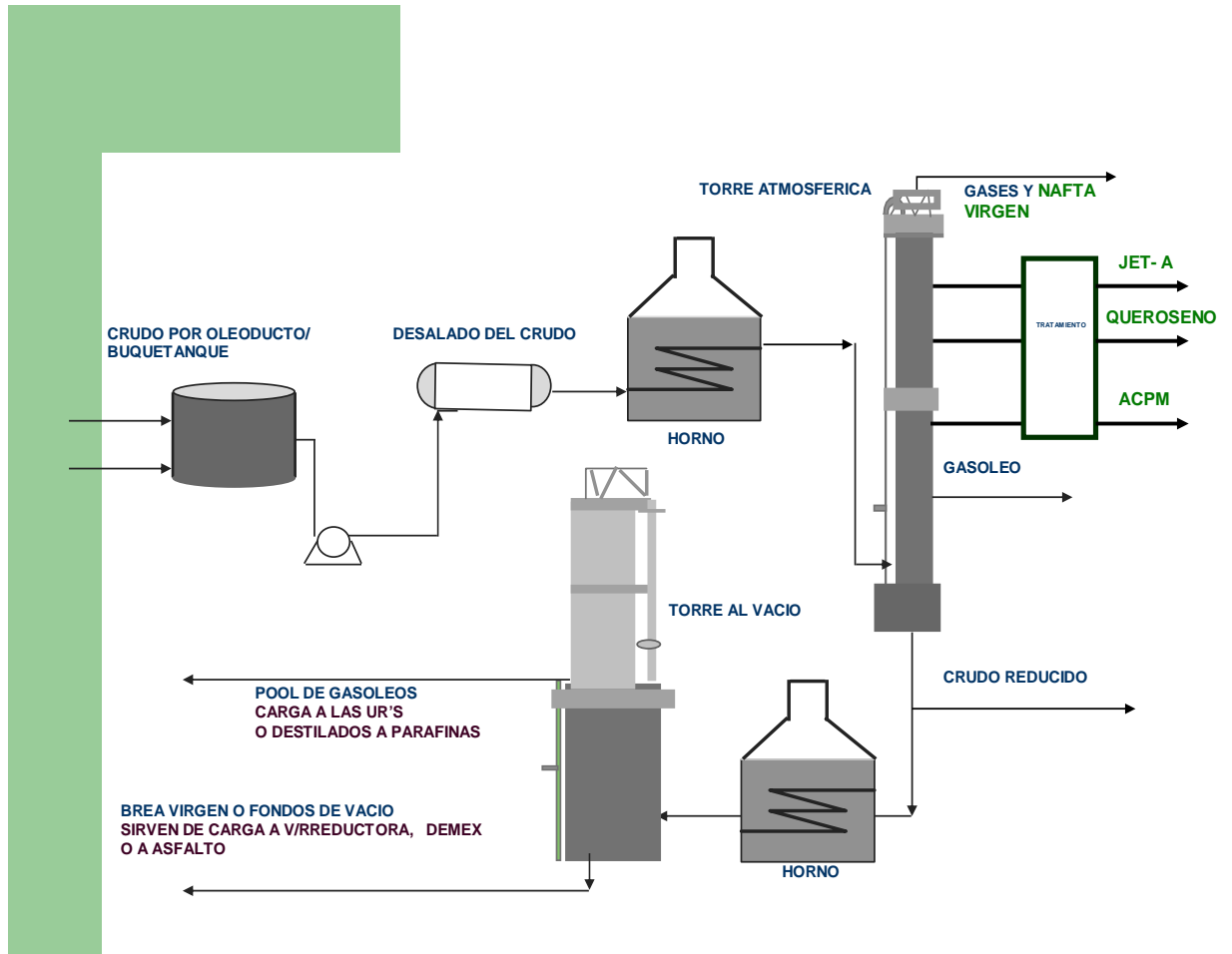
El esquema de proceso desarrollado en una planta industrial de destilación de crudo se muestra en la Figura 3.

2.1.1. Sección de Destilación Atmosférica

La unidad de destilación atmosférica tiene por objeto separar el petróleo crudo en un cierto número de cortes o fracciones clasificadas en función de las temperaturas de ebullición de los hidrocarburos. Estos cortes de destilación se regulan para hacerlos corresponder aproximadamente con las especificaciones de destilación, lo que condiciona su rendimiento con respecto al crudo. Los hidrocarburos se clasifican en función de su volatilidad es decir, de acuerdo con su peso molecular. Esta sección se opera a una presión ligeramente superior a la atmosférica.

El crudo se precalienta en el tren de intercambio con los productos y se calienta en el horno hasta una temperatura que permite la vaporización de los productos de cima y laterales de la torre. El efluente del horno se carga a la zona de vaporización instantánea (zona "flash"), de la torre atmosférica, donde el vapor y el líquido se separan. La destilación establece una contracorriente de líquido y de vapor.

Figura 3. Diagrama General del Proceso de Destilación de Crudo en una Planta Industrial



El contacto de las dos fases da lugar a un intercambio de componentes, donde los más volátiles se mezclan con el vapor que sale por la parte superior de la torre, mientras que los más pesados pasan a la fase líquida, que se extrae por el fondo y las secciones laterales.

La separación de los componentes de los productos es incompleta, ya que componentes de los productos laterales permanecen en la fase líquida y a su vez, componentes de los fondos se encuentran en la fase vapor. La fase líquida que sale de la zona flash, es despojada con vapor de agua para recuperar los componentes de los productos laterales y posteriormente se retira por el fondo de la torre como fondos atmosféricos o crudo reducido. Los vapores que salen de la zona flash, son fraccionados en la zona de lavado, que es la sección de la torre comprendida entre la zona flash y el plato colector del producto lateral inferior (gasóleo atmosférico), para remover los componentes de los fondos atmosféricos, presentes en la fase vapor. Los componentes más pesados en la fase vapor se fraccionan y condensan en los platos siguientes por la acción de reflujos circulantes (pumparound) ya sean internos o externos. Los condensados se retiran de la torre como cortes laterales.

Como éstos líquidos tienen atrapados componentes de la fase liviana, generalmente se despojan con vapor en torres despojadoras laterales anexas a la torre principal.

Los componentes más livianos salen por la cima de la torre hacia un condensador donde la nafta, el agua y parte del propano-butano se condensan pasando al tambor de destilado de cima, que sirve para separar el gas de la fase líquida y la nafta del agua; parte del contenido de este tambor se utiliza como reflujo superior y el exceso se envía como nafta producto.

2.1.2. Sección de Destilación al Vacío

Esta sección es operada a la mínima presión de vacío prácticamente posible (normalmente 29"de mercurio), a fin de obtener la máxima vaporización del hidrocarburo para una temperatura dada en la zona flash, que generalmente está limitada a 750°F, por consideraciones de craqueo térmico y calidad de los productos.

Los fondos atmosféricos se cargan al horno de vacío, del cual salen parcialmente vaporizados, hacia la zona flash de la torre. La fase líquida se despoja con vapor de agua y se retira por el fondo de la torre como fondos de vacío, los cuales normalmente se envían hacia una nueva etapa de procesamiento (extracción con solvente, viscorreducción o cracking), a fin de recuperar productos valiosos y disminuir la viscosidad de ésta corriente. Los vapores de la zona flash son fraccionados en la zona de lavado para retirar los componentes de los fondos, presentes en esta fase, y los contaminantes de los productos laterales.

Generalmente, cuando la operación está dirigida hacia la producción de combustibles, en la sección al vacío de las unidades de destilación primaria, se obtiene un solo producto lateral (gasóleo) dividido en dos rangos de ebullición uno pesado y el otro liviano (gasóleo pesado de vacío y gasóleo liviano de vacío), que se carga a las unidades de ruptura catalítica para la producción de gasolina como producto principal. Con crudos de bases lubricantes, la torre de la sección al vacío se opera para obtener dos o más productos laterales de alto punto de ebullición, que se utilizan como materia prima para la producción de diferentes tipos de bases lubricantes.

La corriente de cima de la torre al vacío está compuesta por vapor de agua e hidrocarburos condensables y no condensables que provienen, los segundos, del craqueo térmico que se presenta por las altas temperaturas utilizadas en la sección al vacío, mientras que los condensables resultan del despojo incompleto en el fondo de la torre atmosférica y del arrastre de líquido del plato de cima de la torre al vacío. Los hidrocarburos condensables son recuperados y se envían como gasóleo producto. En refinería a este gasóleo se le conoce como Gasóleo de Relojera.

2.2. DESTILACIÓN EN LA UNIDAD U-200

La unidad de destilación de crudo U-200 es una de las cinco unidades de destilación combinada de la refinería de Barrancabermeja, carga crudo mezclado cuya dieta

generalmente está conformada por la mezcla de los crudos Vasconia, Caño Limón, Omimex y Ayacucho, los cuales le imprimen sus propiedades particulares y por tanto las características que la operación debe manipular en la destilación para su mayor rendimiento.

La U-200 está conformada por las torres atmosféricas denominadas T-201 y T-204 las cuales cargan hasta 55.000 BPD y 25.000 BPD de crudo respectivamente y la torre de vacío T-205 que procesa el crudo reducido de la torre T-204 como esquema principal aunque puede recibir una parte de crudo reducido de la torre T-201 y produce asfalto para cracking y cuando lo requiere la refinería asfalto para ventas.

Como toda Topping la U-200 presenta la integración energética de los productos y reflujos de las torres para calentar crudo en los trenes de intercambiadores que se encuentran antes y después del proceso de desalado y el enfriamiento de los productos Nafta, Jet, Diesel, y Gasóleos se realiza con agua. Cada torre atmosférica tiene su horno que ajusta la temperatura y el nivel de vaporización de entrada a la torre, siendo el horno llamado H-201 el correspondiente a la T-201 y el horno llamado H-202 a la torre T-204, la torre de vacío recibe directamente su alimento sin ningún otro tipo de calentamiento (sin horno de vacío) cargando directamente los fondos (crudo reducido) de la torre T-204. El objetivo principal de esta planta es maximizar la producción de medios es decir de JET y Diesel.

2.2.1. Secciones Principales de la U-200

La unidad U-200 como ya se mencionó es una topping para la destilación de crudo y como tal tiene secciones bien diferenciadas de transferencia de calor, bombeo de fluidos, retiro de impurezas y por su puesto la zona de destilación donde las columnas son el eje del proceso (Figura 4.).

Figura 4. Torres de Destilación de U-200 (de izq. a derecha T-201, T-204 y T-205)



2.2.1.1. Precalentamiento I. Adecua la temperatura del crudo que ingresa al proceso de 90°F a 250°F mediante la transferencia de calor de los productos

obtenidos en las torres al crudo antes de la etapa de Desalado. Los equipos principales que conforman esta sección son 10 intercambiadores de calor.

2.2.1.2. Desalado y Neutralización. Normalmente los crudos provenientes de los tanques de carga contienen oxígeno (como aire disuelto), agua, sales disueltas en agua principalmente de sodio, calcio y magnesio; productos corrosivos tales como azufre libre, H₂S y mercaptanos, sólidos en suspensión como lodos, óxidos de hierro, arena, carbón, sales en cristales etc. Todas estas impurezas se dividen en solubles e insolubles en aceite y causan dentro del proceso los siguientes problemas:

- Corrosión en los sistemas de cima de la torre de destilación.
- Taponamiento en líneas, intercambiadores y tubos de hornos.
- Contaminación de productos residuales.
- Ineficiente operación en hornos y torres por efectos del agua.
- Envenenamiento de catalizadores en unidades de ruptura catalítica.

Con el propósito de disminuir todos estos problemas, el crudo antes de ser cargado al horno, se somete a un proceso de desalado para reducirle el contenido de sal y agua hasta un nivel factible económicamente.

Para tal fin, al crudo precalentado a 260-280°F, se le agrega agua en cantidad suficiente para lograr contacto con las impurezas insolubles en aceite (4-7 % vol). Dentro del desalador el crudo se somete a un campo eléctrico, logrando que las gotas de agua presentes en éste formen dipolos. Al atraerse éstas pequeñas gotas por el efecto de cargas opuestas, se forman gotas de mayor tamaño las cuales por diferencia de densidades respecto al crudo caen al fondo del equipo de donde se retiran en forma continua. El hidrocarburo con valores bajos de sal y BSW sale hacia el horno por la parte superior del desalador.

2.2.1.3. Precalentamiento II. Eleva la temperatura del crudo de 250°F a la máxima temperatura típica alcanzada de 470 °F para H-201 (Horno Atmosférico 201) y 420 °F para el H-202 (Horno Atmosférico 202) mediante la transferencia de calor de los productos obtenidos al crudo por medio de 14 intercambiadores de calor.

2.2.1.4. Calentamiento en H-201 y H-202. Incrementa la temperatura del crudo hasta 690°F para conseguir un porcentaje de vaporizado entre 45% y 55% usando gas combustible, para ello se usa el horno H-201 para alimentar la T-201, y el H-202 para alimentar la T-204.

2.2.1.5. Destilación Atmosférica. Separa el crudo en fracciones para obtener Nafta Liviana y Pesada, Jet A, Queroseno, Diesel, Gasóleo Atmosférico (GOA), Crudo Reducido (CRED). Para éste propósito se usan las columnas T-201 y T-204 (Ver Figura 4), donde la torre T-201 se encuentra provista de tres torres despojadoras denominadas T-202A/B/C para Jet, Diesel y GOA respectivamente, también con tres reflujos internos (cima, medio, inferior) y uno externo; por su parte la columna T-204 actualmente presta el mismo servicio que T-201 como unidad de crudo con una sola despojadora lateral denominada T-207, sin embargo su diseño original es de Viscosreductora, y tiene capacidad máxima de 25000 BPD.

2.2.1.6. Destilación al Vacío en T-205. Retira hasta un 40% de gasóleos, con el fin de mejorar la carga del lado vacío de otras unidades obteniendo valores de penetración de los fondos entre 20– 40mm /s. Capacidad de carga de 13000 BPD.

2.2.1.7. Enfriamiento. Disminuye la temperatura de los productos hasta las condiciones requeridas por los clientes usando agua como servicio industrial.

2.2.2. Productos de la Unidad U-200

2.2.2.1. Productos Atmosféricos. Las corrientes que se separan en la destilación atmosférica son: Nafta ligera y pesada, JET, queroseno², ACPM o Diesel, Gasóleo y Crudo Reducido, cada uno de estos productos tiene su fin dentro de la refinería, algunos como las Naftas, el JET y el Diesel se usan como combustibles terminados después de operaciones auxiliares para su purificación y mejoramiento de propiedades, otros como el gasóleo y el crudo reducido sirven de carga a otras unidades para su mejor aprovechamiento. En el Anexo 1 se muestran las especificaciones técnicas y de seguridad de los combustibles terminados que son comercializados en las refinerías de ECOPETROL S.A a base de las corrientes atmosféricas mencionadas.

Las fracciones ligeras (de bajo punto de ebullición) se difunden en la parte superior de la torre, de donde son extraídas continuamente y enviadas a otras unidades para su ulterior proceso, tratamiento, mezcla y distribución. Las fracciones con los puntos de ebullición más bajos (el gas combustible y la nafta ligera) se extraen de la parte superior de la torre por una tubería en forma de vapores. La nafta, o gasolina de destilación directa, se toma de la sección superior de la torre como corriente de productos de evaporación. Tales productos se utilizan como cargas petroquímicas y de reforma, material para mezclas de gasolina, disolventes y GLP.

Las fracciones del rango de ebullición intermedio (gasóleo, nafta pesada y destilados) se extraen de la sección intermedia de la torre como corrientes laterales y se envían a las operaciones de acabado para su empleo como queroseno, gasóleo diesel, fuel, combustible para aviones de reacción (JET), material de craqueo catalítico (GOA) y productos para mezclas. Algunas de estas fracciones líquidas se separan de sus residuos ligeros, que se devuelven a la torre como corrientes de reflujo descendentes.

Las fracciones pesadas, de alto punto de ebullición (denominadas residuos o crudo reducido), que se condensan o permanecen en el fondo de la torre, se utilizan como fuel, para fabricar betún o como carga de craqueo, o bien se conducen a un calentador y a la torre de destilación al vacío para su ulterior fraccionamiento [5].

2.2.2.2. Productos de Vacío. Una torre de vacío ordinaria de primera fase produce gasóleos (liviano y pesado), material base para aceites lubricantes y residuos pesados para desasfaltación de propano. Por lo común, las torres de vacío se usan

²En la Refinería de Barrancabermeja no se produce queroseno por la baja demanda.

para separar productos de craqueo catalítico del residuo sobrante. Asimismo, los residuos de las torres de vacío pueden enviarse a un coquificador, utilizarse como material para lubricantes o asfalto, o desulfurarse y mezclarse para obtener fuel bajo en azufre [5]. Los fondos de vacío que produce la T-205 por lo general son de calidad suficiente para venderse directamente, mientras que el de las demás unidades se direcciona a las plantas de ruptura catalítica o cracking.

2.2.3. Caracterización Torre Atmosférica T-201

2.2.3.1. Proceso.³ A la salida del horno el crudo se encuentra a una temperatura entre 675 y 700 °F, una presión entre 32-35 PSIG y un porcentaje vaporizado entre 30 y 44% dependiendo del tipo de crudo cargado a la unidad, para ser alimentado a la torre atmosférica T-201 a través de la línea de transferencia, donde se tiene una caída de presión mínima y un régimen de flujo anular y entra a la torre por una boquilla tangencial de 18 pulgadas de diámetro. El fondo de la torre opera a una temperatura de 670 °F y la cima a 290 °F.

La fracción pesada del crudo cae hacia el fondo y es despojada mediante vapor de 50psig en cuatro platos de válvula. La fracción liviana del crudo asciende de la zona flash hacia la sección de fraccionamiento, retiro de calor y extracción de productos, hasta el plato 8. En el plato No. 9 se tiene la extracción del primer producto, gasóleo atmosférico que sale hacia la torre despojadora T-202C. A continuación se encuentran los platos 10 - 15 tipo válvula, para llegar a la primera zona de retiro de calor, una sección empacada y un colector de reflujo. En el plato No. 15 se extrae la corriente lateral que se enfría de 630°F a 498°F en los intercambiadores E-222A/B pertenecientes al tren de precalentamiento de crudo, retornando por debajo del plato No. 16 a la zona empacada. Esta corriente es llamada reflujo inferior.

Por encima de la zona de retiro de calor (Plato No. 16) se encuentra el colector de ACPM. Los platos 16 a 22 corresponden a la zona de fraccionamiento entre el ACPM y el JET/QUERO. Por encima del plato No. 22 se encuentra la segunda sección de retiro de calor, compuesta por un distribuidor de reflujo, una zona empacada y un colector de reflujo medio. En este plato No. 15 se extrae la corriente lateral que se enfría de 465°F a 294°F en los intercambiadores E-236A/B pertenecientes al tren de precalentamiento de crudo, retornando por debajo del plato No. 23 a la zona empacada. Esta corriente es llamada reflujo medio.

Por encima de la zona de retiro de calor (Plato No. 23) se encuentra el colector de JET/QUERO. Seguidamente se tiene la zona de fraccionamiento entre JET/QUERO y NAFTA, compuesta por los platos 23 a 30 de tipo válvula. En el plato No. 30 se encuentra el colector de reflujo de cima, teniéndose los platos 31, 32 y 33 para retiro de calor del reflujo de cima, el cual es bombeado de regreso en la torre. Este reflujo de cima es enfriado de 337°F a 90°F en los intercambiadores E-227A/B pertenecientes al tren de precalentamiento de crudo y los enfriadores con agua E-208A/B. Los vapores remanentes, Nafta y vapor de agua (Proveniente del BSW del crudo y vapores de despojo al fondo y despojadores laterales) salen por la parte

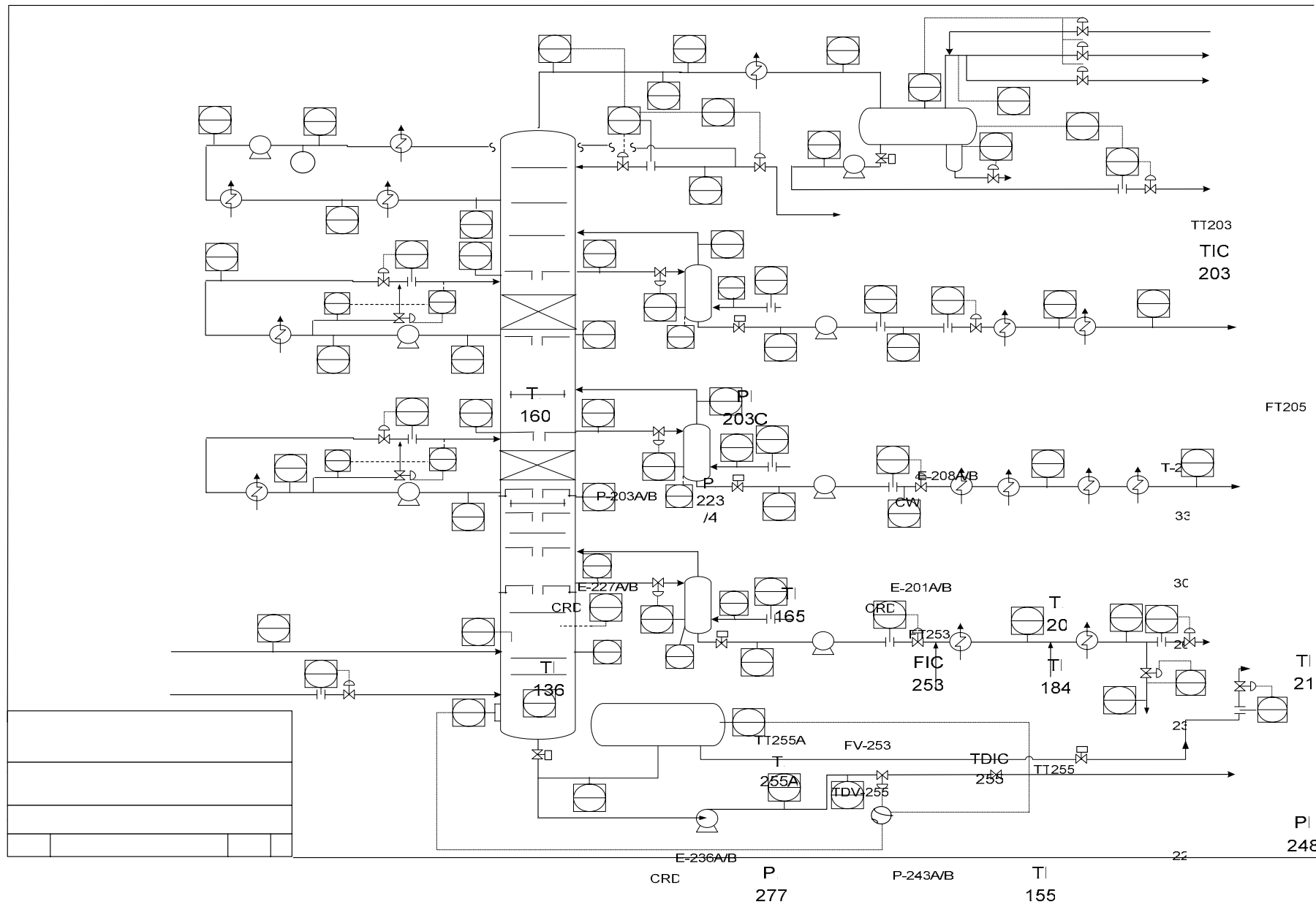
³ Manual de Operación Unidad de Destilación U-200. CIB

superior de la torre y van hacia el sistema de condensadores. En la figura 5 se muestra el diagrama de instrumentación de la torre T-201.

2.2.3.2. Dimensiones y Materiales.⁴ La torre atmosférica T-201 es una columna de con 33 platos tipo válvula y con 2 lechos empacados, con una altura de 95 ft y un diámetro interno de 12 ft. El material de construcción de la torre es acero al carbón SS 316L y SS 410 para la carcasa, acero al carbón SS 316L para el tope y acero al carbón SS 410 para el fondo.

⁴ Datasheet de los equipos de transferencia de Masa de la Unidad de Destilación U-200. Complejo Industrial de Barrancabermeja.

Figura 5. Diagrama de instrumentación de la torre atmosférica T-201



2.2.3.3. Componentes de la Torre Atmosférica T-201. El subsistema de la torre atmosférica se encuentra formado por:

- a. Línea de transferencia desde la salida del horno atmosférico H-201 hasta el plato de entrada a la torre.
- b. Casco de la Torre T-201 (especialmente desde el fondo hasta el plato 16).
- c. Circuito de crudo reducido que comprende la línea del fondo de la T-201, tanque de almacenamiento de crudo reducido D-202, líneas de o hacia otras unidades.
- d. Circuito de gasóleo atmosférico que comprende la línea de T-201 a la torre despojadora T 202C, la T-202C y líneas de gasóleo atmosférico hacia los intercambiadores E-203 y E-213 lado casco pasando por las bombas P-206 A/C. Circuito de retorno de vapores de la T-202C a T-201.
- e. Circuito de reflujo inferior de la T-201 pasando por las bombas P-207 C/D incluyendo los intercambiadores E-222 A/C lado tubos, y la línea de retorno a la torre.
- f. Circuito de Diesel que comprende la línea de T-201 a la despojadora T-202B, la T-202B, líneas de fondo pasando por las bombas P-204 C/D hasta el intercambiador E-202 lado casco, el E-205 A/B lado tubos, y los enfriadores E-211 y E-210 por el lado casco. Circuito de retorno de vapores de la T-202B a T-201.
- g. Circuito de Reflujo Medio de la T-201 pasando por las bombas P-243 A/B, los intercambiadores E-236 A/B y la línea de retorno a la torre.
- h. Circuito de JET/QUERO que comprende la línea de T-201 a la despojadora T-202A, la T-202A, líneas de fondo pasando por las bombas P-239/8 hasta el intercambiador E-232 lado tubos y el enfriador E-209 por el lado casco. Circuito de retorno de vapores de la T-201A a T-201.
- i. Circuito de Reflujo de Cima de la T-201 pasando por los intercambiadores E-201 A/B lado tubos, los E-227 A/B lado tubos, por las bombas P-203 A/B, hasta los enfriadores E-208 A/B y la línea de retorno a la torre.
- j. Circuito de Cima que comprende la línea con vapores desde T-201 hasta los enfriadores E-207 A/B, el tanque de almacenamiento de condensados D-201 y la línea de Nafta a tratamiento pasando por las bombas P-202C/D.

Las líneas de proceso mencionadas anteriormente son los circuitos de la torre T-201 que le permiten conectarse con el resto de la planta y son de vital importancia para esta investigación, ya que presentan vulnerabilidad a escapes y fugas, por tanto para entender su ubicación dentro de la torre se puede ver el diagrama de instrumentación de la Figura 5 y para su descripción detallada revisar la Tabla 1.

Tabla 1. Líneas de Proceso de la Torre Atmosférica T-201

Circuito	Línea*	Descripción
Salida Horno	18"-CRD-03005-388	Crudo vapor –líquido de H-201 hasta T-201.
Gasóleo Atmosférico	6"-GAL-04023-388B	Gasóleo líquido de T-201 a T-202C
	6"-LIH-04080-39A	Vapores de agua y gasóleo de T-202C a T-201
Reflujo Inferior (LPA)	8"-GAL-04015/6-388/B	Diesel líquido de T-201 a P-207C/D
	6"-GAL-04075-388	Diesel líquido de P-207C/D a E-222A/C
	6"-GAL-04022-39A	Diesel líquido de E-222A/C a válvula FV-211
	6"-GAL-01064-11A	Diesel líquido de válvula FV-211 a T-201
Diesel O ACPM	8"-DSO-04013-39A	Diesel líquido de T-201 a T-202B
	6"-LIH-04012-39A	Vapores de agua y Diesel de T-202B a T-201
	6"-DSO-04066-39A	Diesel líquido de T-202B a bomba P-204C/D
	6"-DSO-04069-11A	Diesel líquido de P-204C/D a FV-208
	6"-DSO-01038- 11A	Diesel líquido de FV-208 a E-202
	6"-DSO-01039- 11A	Diesel líquido de E-202 a E-205
	6"-DSO-01030- 11A	Diesel líquido de E-205 a E-211/E210
Reflujo Medio (MPA)	6"-DSO-04006/7-39A	JET líquido de T-201 a P-243A/B
	6"-DSO-04009-11A	JET líquido de P-243A/B a E-236A/B
	6"-DSO-01033-39A	JET líquido de E-236A/B a válvula FV-253
	6"-DSO-04010-39A	JET líquido de válvula FV-253 a T-201
JET/ QUERO	6"-KER-04005-39A	JET líquido de T-201 a T-202A
	6"-LIH-04004-39A	Vapores de agua y JET de T-202A a T-201
Reflujo Cima (UPA)	12"-NAP-04003-39A	Nafta Pesada líquida de T-201 a E-201A/B
	10"-02224A	Nafta Pesada líquida de E-201A/B a P-203A/B
	10"-KER-04025-39A	Nafta Pesada líquida de P-203A/B a E-208A/B
	8"-KER-04026-39A	Nafta Pesada líquida de E-208A/B a válvula FV-205
	8"-KER-04027-39A	Nafta Pesada líquida de válvula FV-205 a T-201
Cima	16"-LIH-04041-39A	Vapores de Agua y Nafta de T-201 a E-207A/B
	8"-02117A	Agua -Nafta condensados y vapores de E-207A/B a D-201
	6"-NAP-04053-39A	Nafta líquida de D-201 a bombas P-202C/D
	3"	Nafta líquida producto de P-202C/D a válvula FV-225
	3"	Nafta líquida producto de FV-225 a otras unidades
CRED	12"-PRL-04028-388B	CRED líquido de T-201 a P-225 ^a
	8"- PRL-04033-388	CRED líquido de P-225A a válvula LV-201
	6" -PRL-07056-388	CRED líquido de LV-201 a otras unidades

*El primer número de la denominación corresponde al diámetro de la tubería.

FUENTE: P & I. Flow Diagram. Unidad de Destilación de Crudo U-200.

2.4. MATERIA PRIMA DE LA DESTILACIÓN: EL PETRÓLEO CRUDO

El petróleo es una mezcla de compuestos químicos llamados “ hidrocarburos ” debido a que está constituido por los elementos Hidrógeno (11-14%w) y carbono (84-87%w), acompañado de otros elementos tales como el azufre (0.5-3%w), oxígeno y nitrógeno (0-5%w), agua (0.1-3.0%vol), sales generalmente, cloruros, silicatos y sulfatos de sodio, calcio y magnesio (máximo 0.05%w) y compuestos organo-metálicos como níquel, vanadio, hierro, sodio (5-400 ppm).

Los compuestos de azufre en el petróleo y sus derivados se destacan como componentes indeseables, pues provocan corrosión, tienen olor desagradable y empobrecen las características de explosión de la gasolina. El azufre en el petróleo se encuentra siempre combinado, formando una gran variedad de compuestos, cuya distribución en los destilados de un crudo dado depende de su procedencia.

Aun cuando en el petróleo su impureza más perjudicial es el azufre combinado, existen otros componentes en pequeñas proporciones, que sin embargo le confieren propiedades que es necesario considerar, pues por lo general son perjudiciales. Los petróleos crudos suelen tener hasta un 2% de oxígeno, la mayor parte del cual se encuentra combinado. Tal como sucede con el azufre, el porcentaje de compuestos oxigenados aumenta con el punto de ebullición de la fracción, concentrándose, por lo tanto, especialmente en el crudo reducido.

Se ha reconocido en el petróleo la presencia de ácidos cresílicos y fenoles, entre los compuestos oxigenados de crudos de diversas procedencias, pero los compuestos más importantes son los ácidos nafténicos, asfaltos y resinas. Los ácidos nafténicos se producen probablemente por oxidación de ciertos naftenos presentes en el crudo. Si este es de base parafínica, contiene en general muy pequeños porcentajes de estos ácidos (menos de 0,01), pero pueden llegar a más de 1% en los de base nafténica.

2.4.1. Crudo Carga a la Unidad U-200

La carga de crudo usada para el diseño y posterior revamping de la unidad U-200 fue de calidades entre 22 y 32 API, sin embargo debido a la poca disponibilidad de crudos livianos en la refinería actualmente la unidad se encuentra alimentándose con una mezcla pesada de crudos cuya gravedad API promedio oscila entre 22-23.

3. METODOLOGÍA: ESTRUCTURA GENERAL DEL ANÁLISIS DE RIESGO TECNOLÓGICO

En este capítulo se describen las diferentes etapas cualitativas y cuantitativas que se usaron para el desarrollo de la investigación.

Al realizar un análisis de riesgos es necesario conocer a profundidad el proceso que se quiere estudiar, de igual manera se debe delimitar el sistema, de lo contrario la labor se extenderá de una manera exponencial y por tanto no se podrá encontrar un veredicto acertado de las situaciones detectadas; una vez se ha delimitado y se ha comprendido a cabalidad el sistema, la siguiente fase se centra en el estudio, análisis y evaluación de la amenaza, donde se debe identificar en la planta/proceso que tipos de peligros existen y cuáles serían los posibles eventos amenazantes que se generarían a partir de algún evento iniciante que puedan conllevar al desarrollo de un accidente. Finalmente, una vez se realice la identificación de estos eventos amenazantes se continuará estimando y evaluando las posibles consecuencias sobre las personas, el medio ambiente, la operación o la infraestructura para así obtener una valoración del riesgo y posteriormente determinar su grado de aceptabilidad dentro de la planta [1].

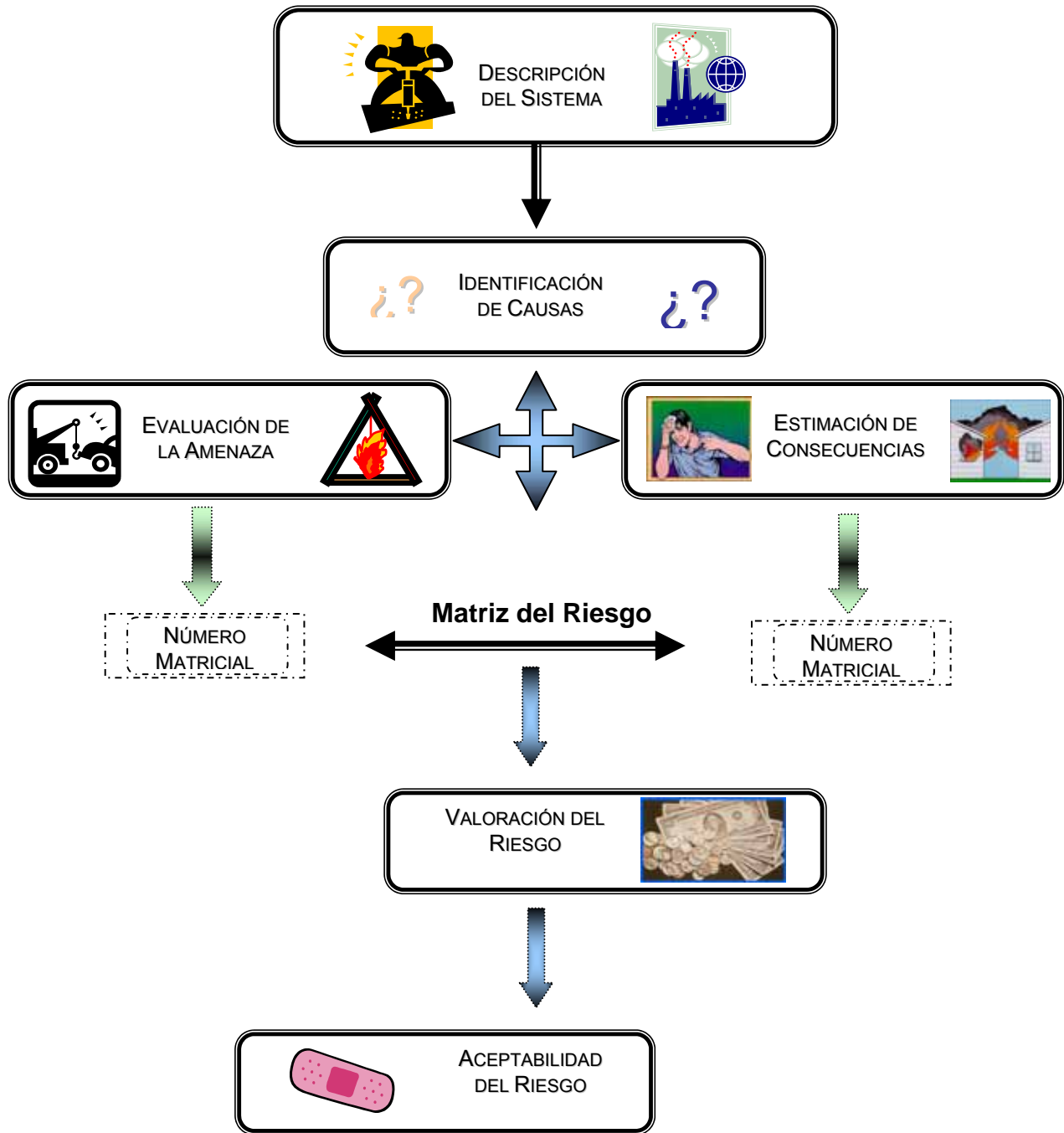
Lo anterior es solo un panorama general de la estructura del análisis de riesgos, por lo que en el desarrollo de esta investigación se profundizará en cada una de las etapas mencionadas donde se combinarán razonamientos cualitativos y cuantitativos para alcanzar los objetivos de este trabajo. La Figura 6 muestra la estructura mencionada.

3.1. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La identificación y caracterización del sistema comprendió la división de éste en componentes más pequeños llamados subsistemas, los cuales se agruparon por el tipo de servicio prestado al proceso y por las condiciones de operación mantenidas normalmente.

Clasificados los subsistemas se procedió a identificar los elementos principales para cada uno y el análisis se aplicó sólo a estos, sin embargo se debe aclarar que aquellos elementos pequeños como bridas, válvulas, líneas de instrumentación, etc formaron parte del análisis debido al impacto que tienen en el subsistema principal, pues estos son los mayores promotores de derrames y escapes.

Figura 6. Estructura del Análisis de Riesgos



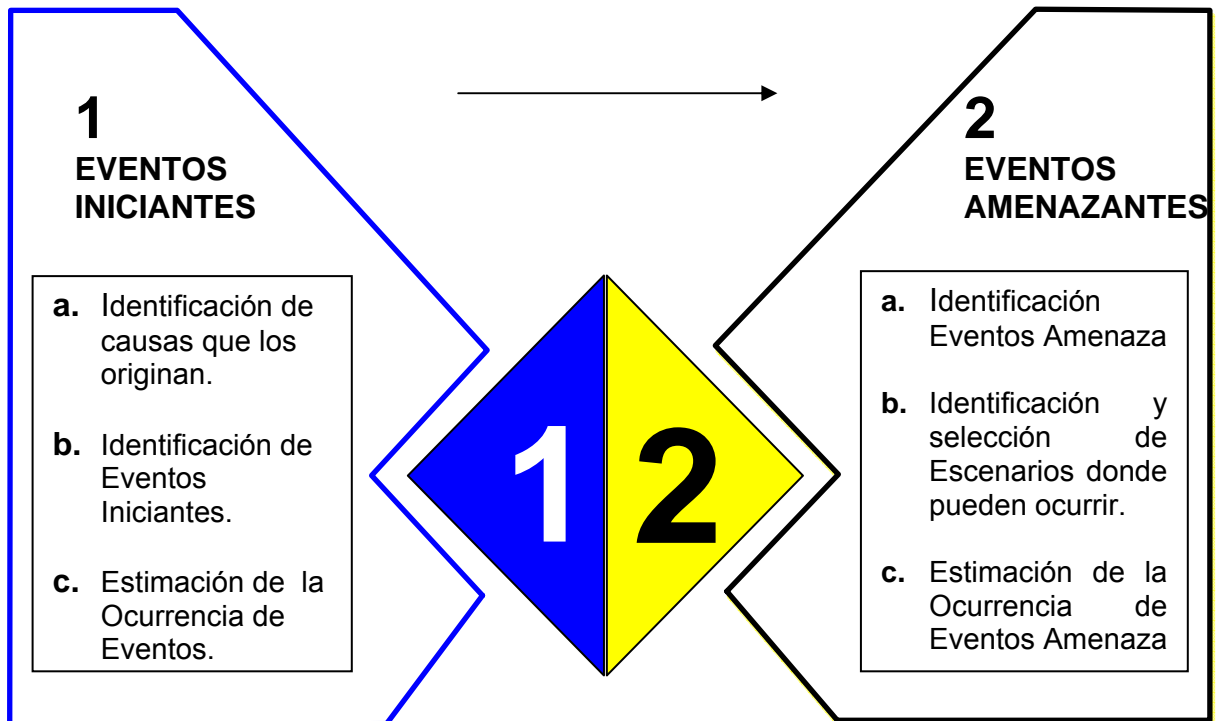
3.2. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

La amenaza tecnológica de la planta/proceso sobre el entorno está representada en los productos que se reciben, almacenan, procesan, despachan y transportan desde la instalación. En caso de ocurrir escapes o derrames por determinadas causas, se

pueden desencadenar eventos amenazantes que afectarían a personas, bienes, al medio ambiente y a la operación misma.

A continuación se esquematiza el desarrollo de la amenaza (Figura 7) usada en este estudio, partiendo de diversas causas que producen eventos iniciantes que posteriormente se desarrollan en eventos amenazantes como incendios, explosiones y derrames.

Figura 7. Esquema del Análisis y Evaluación de la Amenaza.



Por consiguiente, el objetivo primordial de la evaluación de la amenaza es la selección y caracterización de los eventos iniciantes y amenazantes de acuerdo con los escenarios identificados y las causas de falla que los originan.

3.2.1. Eventos Inicantes

3.2.1.1. Identificación y Selección de Causas. Las causas más frecuentes de falla en las industrias son los errores operacionales, falta de mantenimiento, fallas mecánicas, movimientos naturales y otras normales al proceso de operación. Adicionalmente y debido a la situación sociocultural del país existen otras causas de origen social que pueden afectar en igual o mayor medida el sistema analizado.

Cada causa se analizó desde dos puntos de vista, el primero fue la frecuencia con que ocurrió y el otro el grado de afectación que causa al sistema. Teniendo en cuenta estos dos factores en la sección 4.2.2.1 se seleccionaron las causas de falla

de mayor relevancia dentro del sistema basado en los registros almacenados en el portal de incidentes de la refinería de Barrancabermeja y soportados con los juicios del personal perteneciente al proceso.

Para facilitar el manejo de la variedad de causas, estas se agruparon por modos de falla, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Modos de Falla usados en la identificación y selección de causas

MODOS DE FALLA	CAUSAS
De Origen Operacional	<ul style="list-style-type: none"> -Acciones Humanas (Fallas de mantenimiento, operadores sin experiencia). -Corrosión (interna, externa) -Fallas Mecánicas (por vibración, desgaste). -Fallas Eléctricas -Sistemas de control -Mantenimiento y limpieza -Dependencia operacional
De Origen Social	<ul style="list-style-type: none"> -Trabajadores (huelga, sabotaje, etc.) -Contratistas (atentado, hurto, etc.)
De Origen Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> -Estrés Físico -Condiciones Ergonómicas
De Origen Natural	<ul style="list-style-type: none"> -Movimientos sísmicos -Inundaciones -Erosión -Fenómenos hidrometeorológicos
De Origen Organizacional	<ul style="list-style-type: none"> -Falta de programas y procedimientos de mantenimiento. -Desconocimiento del Protocolo de comunicaciones.
De Tipo Constructivo	<ul style="list-style-type: none"> Falla en diseños. Falla de construcción.

3.2.1.2. Identificación de los Eventos Inicantes. Como se definió anteriormente, un evento iniciante es “la liberación o pérdida de materia y/o energía contenida en un recipiente”. Esta falta de contención puede ser originada por una variedad de causas como se mencionó en la sección anterior y dependiendo de su magnitud, pueden tener consecuencias negativas en el entorno del sistema.

Los eventos iniciantes más comunes son el vertimiento, escape, derrame y liberación de productos en la planta/proceso, los cuales son causados por diferentes acciones como sobrepresión, errores de operación del personal, fallas mecánicas de los equipos, entre otros.

La identificación de los eventos iniciantes en la operación se realizó mediante el reconocimiento en campo de los equipos que podían dar lugar a derrames y/o escapes de productos, con la experiencia del personal de la refinería y en especial con la evidencia objetiva de los registros del portal de incidentes de la refinería de Barrancabermeja.

3.2.1.3. Estimación de Ocurrencia de Eventos Iniciantes. La estimación de ocurrencia de los eventos iniciantes se puede determinar a partir de dos formas: frecuencia y probabilidad.

La frecuencia se determina como el número de eventos iniciantes (escape/derrame de producto) esperados, por unidad de tiempo en un sistema dado. Mientras que la probabilidad es un factor adimensional y puede ser usada para describir la posibilidad de producirse un escape/derrame durante un intervalo específico de tiempo o la probabilidad condicional que un escape/derrame ocurra, dado algún suceso precursor.

La obtención de frecuencias de escapes/derrames conlleva a la recopilación histórica de todos los escapes/derrames ocurridos en la planta/proceso. Como se ha mencionado anteriormente la información que se usó para realizar estos cálculos fue la registrada en el portal de incidentes de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja (GCB).

3.2.2. Identificación y Selección de los Eventos Amenazantes.

3.2.2.1. Identificación de Eventos Amenazantes. Una vez identificadas las causas que pueden originar los eventos iniciantes, el siguiente paso dentro del análisis es identificar cuáles de estos eventos se pueden desarrollar en eventos amenazantes de acuerdo con los sistemas presentes en la planta.

La metodología que se siguió para esta identificación cualitativa fue la conocida como árbol de eventos, la cual desarrolla de forma secuencial los eventos posteriores a la liberación del producto (escapes/derrames), hasta llegar al evento amenazante.

La construcción de un árbol de eventos es secuencial, y se desarrolla de izquierda a derecha. Su construcción inicia con el evento iniciante en su extremo izquierdo, se continúa desarrollando con los diferentes eventos o funciones de seguridad secuenciales al escape/derrame y/o los eventos precursores a otros, hasta llegar a los eventos amenazantes de interés para el estudio.

3.2.2.2. Estimación de Ocurrencia de Eventos Amenazantes. Los parámetros de frecuencia de ocurrencia de los eventos amenazantes se pueden determinar con base en la vida útil operacional esperada de la planta y se deben soportar con los juicios del personal de la operación, los cuales de acuerdo con su experiencia, ubican la frecuencia de ocurrencia de acuerdo con los parámetros sugeridos.

En este punto se usó la información registrada en el portal de incidentes de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja (GCB) de los eventos amenazantes presentados en las plantas de topping para un periodo de 2 años y una vida útil esperada de la planta de 30 años aproximadamente.

3.3. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS

El análisis de consecuencias dentro del análisis del riesgo cuantifica los efectos físicos de los eventos amenazantes y los daños causados por estos de acuerdo con los diferentes tipos de consecuencias.

Los objetivos principales del análisis de consecuencias en esta Monografía son determinar las zonas de afectación y protección ante la ocurrencia de un evento amenazante y cuantificar el daño sobre personas y bienes.

Los componentes básicos que se usaron para este análisis son:

- ✓ Determinación de las zonas de afectación y áreas de protección para los efectos de radiación térmica, ondas de presión y contaminación físico-química (modelamiento con PHASTProfessional), de los escenarios identificados como más críticos dentro de la planta.
- ✓ Calificación preliminar de los efectos esperados y causados sobre los entornos de interés para la empresa. Estimación de las pérdidas económicas por daños en las instalaciones de la planta y de áreas vecinas y las afectaciones y pérdidas sobre seres humanos.
- ✓ Valoración semicuantitativa del riesgo de los eventos amenazantes más críticos identificados en la torre atmosférica T-201 utilizando la Matriz RAM y otra Matriz usando criterios propios para una planta industrial de este tipo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se desarrollan las etapas programadas en la metodología, iniciando con la justificación de la escogencia del subsistema y su respectiva descripción, ya que la planta industrial U-200 está compuesta por diversas secciones en las cuales se podría plantear una investigación de este tipo y que por el alcance de este estudio no se contemplaron. De la misma manera, se continúa avanzando a través de la metodología con la identificación y evaluación de la amenaza en la torre atmosférica T-201, analizando las causas de los eventos iniciantes que generan los eventos amenazantes que finalmente podrían ocasionar accidentes en dicha torre con alcances quizás en el resto de la planta y/o en plantas aledañas sin no se controlan sus consecuencias.

Por último se estiman las consecuencias de los eventos amenazantes detectados en tres de los escenarios más críticos de la torre, determinando las distancias alcanzadas por los efectos de dichos eventos a partir de la configuración de dichos escenarios en el programa de modelamiento PHAST Professional (Process Hazard Analysis Software Tools) versión 6.2.1 y se dará una cuantificación aproximada de las pérdidas o lesiones humanas y económicas para la Empresa.

4.1. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Una planta industrial de destilación de crudo como se describió en el capítulo 2 es un conjunto de operaciones de transferencia de masa y energía entrelazadas sistemáticamente las cuales permiten obtener productos terminados y materias primas de gran valor agregado para el mundo de los combustibles, tales como Diesel, JET y Nafta (Gasolina sin procesar).

El manejo de sustancias peligrosas y la gran cantidad de equipos especializados con condiciones termodinámicas considerables, hace necesaria la escogencia de un subsistema dentro de toda la unidad para delimitar el estudio del análisis de riesgo y ubicarlo dentro de los alcances de la monografía, por tanto, en las secciones siguientes se sustenta la escogencia del subsistema cuya descripción se realizó en la *sección 2.2.3*.

4.1.1. Escogencia del Subsistema

Para realizar la escogencia del subsistema se utilizaron varios criterios:

- ✓ Importancia del subsistema dentro de la Unidad.
- ✓ Cantidad manejada de carga en el subsistema (en volumen de crudo).
- ✓ Mecanismos de daño presentes por la operación típica de la unidad.

Los criterios se aplicaron en los subsistemas hasta encontrar el definitivo para el análisis a través de una eliminación secuencial, donde cada subsistema que se elimina por algún criterio no se considera en el siguiente filtro de la escogencia.

4.1.1.1. Importancia del Subsistema dentro de la Unidad U-200. Las torres de destilación tanto en condiciones atmosféricas (T-201 y T-204) como de vacío (T-205) constituyen junto con los hornos atmosféricos (H-201 y H-202) las operaciones más importantes dentro de la unidad, debido a las condiciones operacionales que manejan y la cantidad y calidad de productos que generan. Las torres atmosféricas se consideraron en este criterio, ya que separan la materia prima y algunos productos terminados de combustibles típicos (Gasolina, JET, ACPM) con alto valor agregado para la refinería. Por su parte los hornos permiten alcanzar la suficiente temperatura para vaporizar los productos de cima y laterales presentes en el crudo que finalmente se separan en las torres.

Por su parte, la sección de vacío (torre T-205) realiza un proceso único dentro de la unidad y su importancia se debe a que los productos que separa son alimento de otras unidades aguas abajo como las unidades de Ruptura Catalítica y en la mayoría de los casos produce asfalto para ventas como producto terminado de acuerdo a la necesidad de la refinería.

4.1.1.2. Cantidad manejada de Carga en el Subsistema. Respecto a las torres atmosféricas, la torre T-201 es de mayor importancia por la cantidad de carga que procesa (55000 BPD) y por ende la cantidad de productos valiosos que separa, respecto a la otra torre T-204 que carga máximo 25000 BPD; por tanto entre estas dos torres se prefiere para el análisis la de mayor capacidad ya que las condiciones operacionales y los equipos participantes son similares.

Los hornos atmosféricos H-201 para la torre T-201 y H-202 para la torre T-204 operan bajo el mismo principio de intercambio de calor, sin embargo el H-202 tiene mayor potencia de calentamiento, ya que fue diseñado para la operación de viscorreducción. A pesar de lo anterior, este horno no se usa a su máxima capacidad, ya que actualmente funciona como calentamiento final del crudo para entrar a una torre atmosférica que no requiere temperaturas tan elevadas. A pesar de lo descrito, la importancia de este horno se ve disminuida por la baja carga que ingresa a sus serpentines ya que el crudo que sale va hacia la torre T-204 y por tanto está sujeto a la capacidad de ésta columna (25000 KBP). Por su parte el H-201 tiene una capacidad equivalente a la torre atmosférica T-201 razón por la cuál se escoge como de mayor importancia debido a su capacidad instalada (55000 BPD) entre estos dos subsistemas.

La torre de vacío T-205 maneja una carga muy baja de crudo reducido (13000 BPD) respecto a la carga de la torre T-201, por tanto queda descartada por este criterio.

4.1.1.3. Mecanismos de daño presentes por la operación típica de la unidad. En este punto, los dos subsistemas que clasificaron fueron la torre atmosférica T-201 y el horno H-201, por tanto sobre estos se realizó el análisis de este criterio.

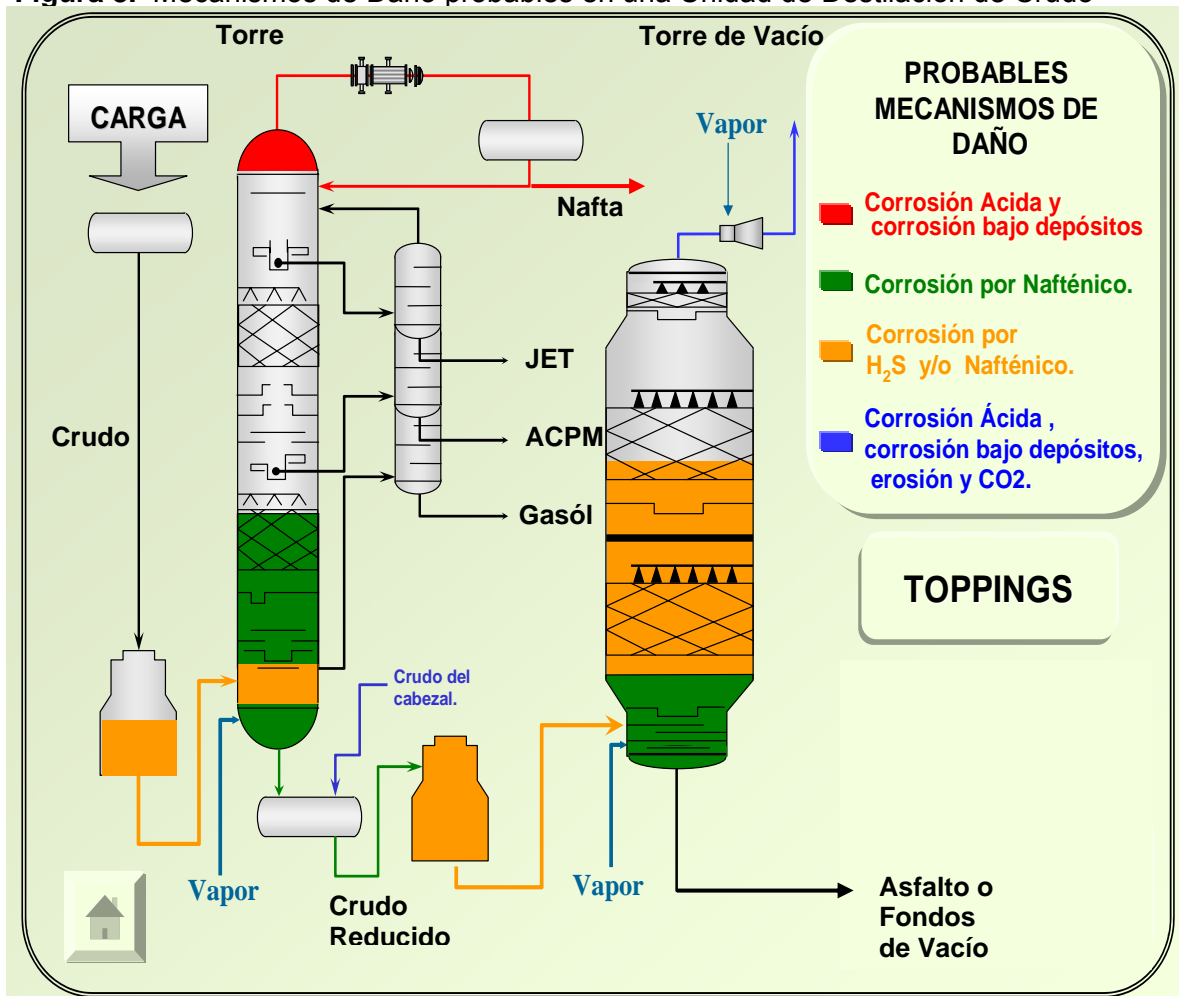
Normalmente, los crudos contienen oxígeno como aire disuelto, agua, sales de sodio, calcio y magnesio principalmente, disueltos en agua, productos corrosivos tales como azufre libre, H₂S (ácido sulfhídrico) y RSH (mercaptano), sólidos en suspensión, como lodos, óxidos de hierro, arena, carbón, sales en cristales, etc.

La mayor parte de las sales (cloruros) de calcio y magnesio, a la temperatura de operación del horno y de la torre se hidrolizan formando el ácido clorhídrico, producto altamente corrosivo, que ataca principalmente el sistema de cima de la torre, por otro lado en la cima también se encuentra CO_2 y H_2S compuestos generados por reacciones internas o por adición en el vapor de despojo.

Otros mecanismos de daño por corrosión interna están asociados al ataque por azufre (sulfuros) y por ácidos nafténicos y la velocidad de corrosión depende de la composición (%S y TAN) de cada corriente de hidrocarburos. La alta temperatura en los hornos y las torres produce que los compuestos sulfurados presentes en el crudo (Mercaptanos, Sulfuros y disulfuros, Tiofeno y sulfatos orgánicos) aumenten su actividad química y se descompongan parcialmente dando H_2S , que es el más corrosivo de todos.

Toda la información que se ha mostrado permite concluir que aunque los dos subsistemas están propensos a los mecanismos de daño expuestos, el subsistema de la torre atmosférica los exhibe simultáneamente en varias zonas como se muestra en la Figura 8, por tanto la torre T-201 fue la seleccionada para el análisis de riesgo tecnológico pertinente a esta investigación y todos sus detalles se muestran en la *sección 2.2.3*.

Figura 8. Mecanismos de Daño probables en una Unidad de Destilación de Crudo



En esta base de datos los registros de incidentes de las unidades de Destilación de Crudo se encuentran incluidos dentro del Departamento de Refinación, por tal motivo para el procesamiento de estos registros se depuró la información de 1579 incidentes reportados para dicho departamento en el periodo del 19 de Septiembre de 2003 hasta el 19 de septiembre de 2005, para un tiempo total de 2 años.

En dicho portal se incluyen diferentes categorías de clasificación de incidentes algunas llamadas Confiabilidad, Daño en Bomba, Material, Eléctrico, Escapes productos, Ambiental, Operacional; sin embargo la información encontrada dentro de dichas categorías no exhibió seguridad debido a la calidad de los reportes y a los criterios de clasificación de los usuarios del portal de incidentes en la refinería, motivo que llevó a analizar la totalidad de registros (1579) para realizar una depuración consistente de la información allí almacenada.

Se usó la información de todas las unidades de topping, ya que todas presentan los mismos equipos principales, condiciones operacionales similares y manejan las mismas sustancias amenazantes de interés en esta investigación dando una mayor cantidad de datos para generar conclusiones no solo para la unidad U-200 sino en general para las unidades de destilación de crudo de la Refinería del Complejo de Barrancabermeja.

Finalmente se obtuvo la información precisa de los incidentes relacionados con escapes, derrames, contaminación (agua y aire), incendio y otros relacionados con estos eventos (297 registros en total) que fueron la base de este estudio para las cinco (5) unidades Topping existentes en el Complejo de Barrancabermeja denominadas U-150, U-250, U-2000, U-2100 y por su puesto la unidad de interés U-200.

4.3. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

La identificación de amenazas en un sistema comprende las amenazas de la instalación sobre el entorno, y por otra parte las amenazas del entorno sobre la instalación. Esta investigación se ha enfocado en las amenazas generadas desde el interior de la planta U-200 específicamente de la torre atmosférica T-201 al medio que la rodea, dichas amenazas se conocen como tecnológicas.

4.3.1. Identificación de la Amenaza Tecnológica

La amenaza tecnológica en el subsistema de la torre atmosférica T-201 corresponde los eventos de peligro latente que se generan por las operaciones de manejo de hidrocarburos en cualquiera de sus formas a través de la operación de destilación, es decir, crudo vaporizado, crudo reducido, gasóleo atmosférico, diesel o ACPM, JET, Nafta y por supuesto los vapores que salen de la cima de la torre como mezcla de vapor de agua, nafta, y gases no condensables (hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, metano, etano y olefinas principalmente). Las propiedades peligrosas (físicas, químicas y toxicológicas) de estas sustancias pueden lesionar a las personas expuestas y pueden crear un accidente mayor si se produce una pérdida de contención de estos fluidos.

Además de las sustancias mencionadas propias de la torre T-201, se debe resaltar que alrededor de estas corrientes surgen otras alternas que son también participes de este estudio como el aceite liviano de ciclo usado en actividades de limpieza y mantenimiento de los equipos de la planta, el aceite usado para lubricar las bombas y otras corrientes como las de la torre de vacío, el propio petróleo crudo que recorre la unidad por los trenes de intercambiadores y otras corrientes provenientes de otras unidades que pueden generar eventos de interés para este estudio. Por tanto en la se resumen los hidrocarburos que son las amenazas para la unidad de destilación U-200 y general para cualquier unidad de Destilación de Crudo.

Tabla 3. Sustancias Amenaza en las Unidades de Destilación de Crudo de de la Refinería de Barrancabermeja

AMENAZA	DENOMINACIÓN	PROCEDENCIA
Nafta	Nafta	Torre Atmosférica
Jet	Jet	Torre Atmosférica
Diesel	Diesel	Torre Atmosférica
Gasóleo Atmosférico	GOA	Torre Atmosférica
Crudo Reducido	CRED	Torre Atmosférica
Gasóleo de Relojera	GReloj	Torre de Vacío
Gasóleo Liviano de Vacío	GLV	Torre de Vacío
Gasóleo Pesado de Vacío	GPV	Torre de Vacío
Fondos de Vacío	Fondos	Torre de Vacío
Crudo	Crudo	Intercambiadores de Calor
Aceite Liviano de Ciclo	ALC	Limpieza y Mantenimiento
Aceite	Aceite	Bombas
Slurry	Slurry	Otras unidades

Estas corrientes son consideradas como peligrosas dentro de la unidad por su alto grado de inflamabilidad, principalmente por su gran volatilidad, la cual genera vapores que propician atmósferas susceptibles a incendios y explosiones, los cuales se pueden desencadenar por el contacto con fuentes de ignición tales como superficies metálicas calientes, equipo eléctrico defectuoso, descargas de electricidad estática, trabajos en caliente (soldadura, corte de tubería, etc.), personas fumando, presencia de fósforos/encendedores, el uso de motores a gasolina o diesel entre otros.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que no solo se catalogó a las sustancias como amenaza por sus propiedades inflamables y tóxicas, sino también por su potencial como fluido de lesionar a personas y generar pérdidas de todo tipo por: estar presentes a alta presión, tener altas temperaturas, estar en dos fases, formar atmósferas peligrosas en el espacio de trabajo que pueda conllevar a la asfixia o ahogo.

Específicamente hablando de la torre T-201, sus condiciones de temperatura y presión son de importancia para generar riesgo, especialmente por las altas temperaturas que se manejan dentro de la columna (entre 290°F y 700°F), igualmente, en las líneas de transferencia también se manejan temperaturas considerables dependiendo del producto transportado ya que provienen de la torre, sin embargo estos valores oscilaran dependiendo de la corriente, y no será menos riesgoso, ya que su potencialidad de daño está enlazado a las propiedades de las sustancias y a la fase. Respecto a la presión, aunque el sistema opera a un valor ligeramente superior al atmosférico (entre 14 y 16 psig) se podría pensar que su incidencia en la ocurrencia de un evento amenazante es leve, sin embargo se debe resaltar el hecho que en toda la torre se está manejando una mezcla gas –líquido de hidrocarburo que puede ser favorecida por cualquier propulsión (presión) para generar un escape o derrame, que dependiendo de las condiciones externas podría desencadenar en un accidente. Por otro lado, debido a que dentro de los circuitos mencionados en la *sección 2.2.3.3.* se contempla la presencia de sistemas de movimientos de fluidos como bombas se debe considerar que además de sus partes vulnerables a escapes como bridas y sellos, su alta presión de descarga puede convertirse en promotora de escapes de interés con posterior desarrollo a incendio.

Tomando en cuenta el panorama de peligro que se mencionó en los párrafos anteriores, el siguiente paso que se realizó fue la identificación y el análisis de los eventos iniciantes que se podrían generar a partir de las sustancias mencionadas y las condiciones de operación del subsistema.

4.3.2. Eventos Iniciantes

En este caso, al manejarse flujos líquidos, gaseosos y mezclas de las dos fases para los hidrocarburos mencionados, los eventos iniciantes que se pueden generar en el subsistema de T-201 son los escapes para gases (crudo vaporizado que entra a la torre, producto de cima de la torre y flujos internos de vapores en la torre) y los derrames para corrientes líquidas (Crudo reducido, GOA, Diesel, JET, Nafta, flujos internos de líquido dentro de la torre, crudo, productos de vacío, ALC, Aceite). Sin embargo, como los fluidos mencionados se encuentran dentro de circuitos que incorporan accesorios, válvulas, instrumentos de medición, bombas con sus respectivos elementos sellos, bridas, uniones entre otros, se debe entender que dependiendo de cuál sea el elemento que presente la falta de contención los fluidos líquidos mencionados podrán exhibir escapes y por tanto no solo aquellos que se consideraron desde el principio como en fase gaseosa o bifásicos tendrán este comportamiento.

Debido a que las fugas y los escapes no se producen espontáneamente, a continuación se consignan las posibles causas que los originan y se seleccionan las de mayor relevancia para el estudio.

4.3.2.1. Identificación y Selección de Causas. El proceso de detectar las causas de falla de mayor relevancia dentro del sistema se realizó usando los registros del portal de incidentes de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja.

A. Identificación:

Teniendo en cuenta que el subsistema de la torre T-201 involucra diversos tipos de equipos, líneas de transferencia, condiciones de operación, instrumentos de medición y control, sistemas de alivio y además maneja un conjunto de sustancias con características de peligrosidad como se ha mencionado, se puede decir que existe una gran variedad de causas que pueden generar escapes/derrames, y otros eventos iniciantes como las consignadas en la Tabla 2 de la sección 3.2.1.1, sin embargo son muy generales y no especifican con detalle las causas específicas en este tipo de actividad industrial.

A continuación se mencionan algunas de dichas causas y en la Tabla 6 se enumera la totalidad que se identificó en este estudio junto con la clasificación de acuerdo al tipo de falla y un identificador que permite su manejo en la matriz de selección de causas.

Los escapes durante el proceso de producción se pueden dar a través de bombas, sellos, empaquetaduras, uniones de tuberías de conducción, en válvulas ya sea por vibración, desgaste por uso, corrosión interna, instalación defectuosa de partes, uso de piezas inadecuadas y/o imperfectas; también ocurren fugas en los sistemas de toma de muestras para el control de la producción por goteo o manipulación inadecuada de los sistemas de muestreo (cuando existen) o por deficiencia de estos, igualmente, por labores de mantenimiento, por efecto de expansión térmica de intercambiadores, por mencionar algunas.

Otras causas que contribuyen a la liberación de material inflamable y contaminante, corresponden a actividades propias del funcionamiento de los equipos considerados en el subsistema (torres, líneas de transferencia, etc.) o por efecto del programa de aislamiento seguro, por mantenimiento o paradas de planta y/o equipos; las causas consideradas por estas actividades son el venteo a la atmósfera de gases de cima en vez de ir a otras plantas a reproceso, el venteo de otros equipos que lo requieran por las facilidades disponibles y el drenaje de hidrocarburos tanto en caliente como en frío al sistema de aguas aceitosas o al sistema de desocupación, y por supuesto la liberación de material gaseoso a la tea por razones de operación o por otra eventualidad.

En el transcurso de esta investigación se validó la gran mayoría de causas esperadas, aparecieron nuevas y otras se dejaron a un lado por falta de evidencias objetivas, sin embargo el hecho que no aparezcan en este estudio no significa que no sucedan o no se puedan presentar, lo único que podría sugerir es que su magnitud es muy pequeña y por tanto se han obviado por las personas de operaciones que realizan el registro de incidentes o quizás por su alta frecuencia se han convertido en otra actividad más dentro de su jornada laboral.

B. Selección:

La calificación de la frecuencia de ocurrencia y el grado de incidencia de la causa, se realizó asignando valores enteros de 1 a 3 tanto a la frecuencia como a la incidencia de generación de una liberación o pérdida de producto contenido. El

valor 1 calificó frecuencia e incidencia de causa baja; el valor 2 calificó las causas de frecuencia e incidencia media y el valor 3 aplicó para causas de frecuencia e incidencia alta.

La determinación de la *frecuencia de ocurrencia* de las causas, se realizó con base en los registros del portal de incidentes para el periodo de 2 años. La metodología usada consistió en determinar el número de veces que cada causa se presentó en este periodo de tiempo, luego determinar el número de ocurrencia máximo y el mínimo entre todas las causas detectadas (Ver Tabla 4) y crear tres intervalos relacionados con los niveles de frecuencia de ocurrencia Bajo, Medio y Alto (Ver Tabla 5) entre el valor mínimo y máximo con un paso de 4.7 valor que sale de restar la frecuencia máxima anual de todas las causas y la frecuencia mínima dividido en el número de intervalos (3 niveles).

Tabla 4. Mínimo y Máximo de Frecuencia de Ocurrencia de Causas

CAUSAS		
Parámetro	F Ocurrencia	
	2 AÑOS	ANUAL
Mín	1	0
Máx	28	14
Promedio	6.4	2.2
Delta	9.0	4.7

Tabla 5. Intervalos de Calificación de Frecuencia de Ocurrencia Anual de Causas

Intervalo	F mín	F máx	CALIF.	INDICE
A	0.0	4.7	Baja	1
B	4.7	9.3	Media	2
C	9.3	14.0	Alta	3

Con estos intervalos se calificó la frecuencia de ocurrencia para todas las causas encontradas en el portal de incidentes y su resultado final se muestra en la Tabla 4.

Tabla 6. Identificación y Selección de Causas en las Unidades de Destilación

FACTOR	I.D.	CAUSAS	F	INCIDENCIA (I)				F*I	SELECCIÓN	
				f	t	c	l		SI	NO
CAUSAS DE ORIGEN OPERACIONAL										
Mantenimiento y limpieza	ML1	Falta de revisión de nivel de los colectores de aguas aceitosas.	1	P	M	M	2	2		
	ML2	Insuficiencia de equipos para separar Hidrocarburo de agua.	1	P	G	M	2	2		
	ML3	Falta de limpieza de los colectores.	1	P	G	M	2	2		
	ML4	Drenaje de equipos, líneas e instrumentos de medición	2	P	M	M	2	4		
	ML5	Labores de Mantenimiento	1	P	M	M	2	2		
	ML6	Rebosamiento de alcantarilla con aguas aceitosas	1	S	G	A	2	2		
	ML7	Trabajos en caliente	1	P	M	A	1	1		
Falla Mecánica	FM1	Filtración de aguas lluvias aceitosas en la caja recolectora cercana al río.	1	P	P	M	1	1		
	FM2	Problemas en líneas de flujo	1	S	G	B	3	3		
	FM3	Problemas en intercambiadores	1	S	G	M	3	3		
Dependencia Operacional	DO1	Producto sin almacenamiento enviado a los colectores de aguas aceitosas.	1	I	P	M	2	2		
	DO2	Imposibilidad de recibo de gases en las plantas de cracking y de productos en otras plantas	1	P	G	M	2	2		
	DO3	Movimientos operacionales	1	P	M	A	1	1		
	DO4	Emanaciones de las plantas de cracking	1	P	G	B	3	3		
	DO5	Emanaciones de torres de destilación	1	I	P	M	1	1		
	DO6	Cambio de carga y calidad de crudo	1	P	M	A	1	1		
Falla Mecánica y/o eléctrica	FME1	Daño en las bombas (skimmers) que succionan los HC vertidos en los colectores de aguas aceitosas.	1	P	G	M	2	2		
	FME2	Problemas en bombas	3	S	M	B	3	9		
	FME3	Disparo del compresor C-245	3	S	M	M	2	6		
	FME4	Alta temperatura y rozamiento entre piezas	1	I	P	M	1	1		
	FME5	Falla en el sistema de inyección de agua	1	P	G	B	2	2		

FACTOR	I.D.	CAUSAS	F	INCIDENCIA (I)				F*I	SELECCIÓN	
				f	t	c	l		SI	NO
CAUSAS DE ORIGEN OPERACIONAL										
Acciones Humanas	AH1	Manejo inadecuado de operación de torres en las variables de presión y nivel	2	P	M	M	2	4		
	AH2	Falta de Revestimiento en líneas y equipos	1	S	M	B	3	3		
	AH3	Equipos en servicio sin los elementos necesarios para su correcta operación	1	P	P	B	2	2		
	AH4	Manejo inadecuado de la operación del desalador	1	P	G	A	2	2		
Acciones Humanas y/o Falla mecánica	AHM1	Fluidos a temperaturas superiores de las diseñadas para líneas y tanques de recibo de producto	3	P	G	A	2	6		
	AHM2	Corrientes de hidrocarburo con exceso de agua	1	P	G	A	2	2		
	AHM3	Venteo de gases	1	P	M	M	2	2		
Sistemas de control	SC1	Falla en instrumentos de medición y control	3	S	M	A	2	6		
	SC2	Problemas con los controles de corrosión en la cima	1	I	G	A	1	1		
Actividades de arrancada y parada de equipos	AAP1	Actividades de arrancada y sacada de servicio del compresor C-245 y torres	2	P	P	M	1	2		
Mantenimiento y limpieza/Falla mecánica/Sistemas de control	MMC1	Derrames de gasóleos al piso y a Alcantarillas	1	P	M	M	2	2		
	MMC2	Problemas en el desalador	1	P	M	A	1	1		
CAUSAS DE ORIGEN NATURAL										
Fenómenos Hidrometeorológicos	FH1	Lluvias	1	I	M	B	2	2		
	FH2	Descargas ceráneas (rayos)	1	I	M	B	2	2		

F: Frecuencia, f: Factibilidad, t: Tamaño, c: Control

La nomenclatura seleccionada para el identificador de las causas (I.D) se rige por las letras iniciales de cada modo de falla identificado y un contador numérico dependiendo de la cantidad de causas presentes en cada modo de falla.

Para hallar la *incidencia de* una liberación o pérdida de producto contenido, se tuvieron en cuenta tres factores, descritos a continuación en orden de importancia:

- ✓ Factibilidad para generar una liberación o pérdida de producto contenido: grado de potencialidad que una causa al manifestarse origine una liberación o pérdida de producto contenido de cualquier sustancia inflamable o tóxica. Esta factibilidad puede ser improbable, probable o segura.
- ✓ Magnitud (Tamaño) de la liberación o pérdida de producto contenido: si existe la factibilidad para generar la liberación o pérdida de producto contenido (probable o segura), se debe evaluar su magnitud en los elementos y operación en análisis (grande, mediano, pequeño).
- ✓ Control inmediato de la liberación o pérdida de producto contenido: considera el grado de control previsto, según la causa. Por ejemplo, se espera que un derrame causado por error operacional, se controle en un tiempo corto, pero si es causado por factores externos al sistema, es probable que las acciones de control para combatir el derrame tomen un tiempo mayor. Este control puede ser entonces alto, medio o bajo.

En el Anexo 2 se registra la forma de calificar el resultado final de la incidencia de acuerdo con la combinación de los 3 factores descritos.

El producto de la frecuencia de ocurrencia de la causa y de la incidencia estableció cuáles causas merecían ser seleccionadas, descartándose aquellas para las cuáles el producto fue menor a 3. En la Figura 9 se muestra la matriz de selección de causas típica, y finalmente en la Figura 10 se ubican las causas encontradas para las unidades de Topping en la matriz de selección usando el identificador mostrado en la Tabla 6.

Figura 9. Matriz típica de Selección de Causas

MATRIZ SELECCIÓN DE CAUSAS

		Alto	6	9	
		Medio	4	6	
FRECUENCIA	Bajo	1	2	3	
			Bajo	Medio	Alto
			INCIDENCIA		

Finalmente, las causas seleccionadas que se ubicaron en las celdas amarillas (como se ilustra en la Figura 10) fueron en orden de impacto descendente los problemas en bombas (FME2), el disparo del compresor C-245 (FME3), manejo de fluidos a temperaturas superiores de las diseñadas para líneas y tanques de recibo de producto (AHM1), falla en instrumentos de medición y control (SC1), manejo inadecuado de operación de torres en las variables de presión y nivel (AH1), drenaje de equipos, líneas e instrumentos de medición (ML4), problemas en líneas de flujo (FM2), problemas en intercambiadores (FM3), emanaciones de

las plantas de cracking (DO4), y por falta de Revestimiento en líneas y equipos (AH2), las cuales inciden directamente en los escapes y derrames, la liberación de hidrocarburos gaseosos a la atmósfera, generación de sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas y tanques, liberación de energía y liberación de gases tóxicos e inflamables como se verá en la siguiente sección.

Figura 10. Matriz de Selección de Causas encontradas en las Unidades Topping de GCB

MATRIZ SELECCIÓN DE CAUSAS

FRECUENCIA	Alto		AHM1 FME3 SC1	FME2
	Medio	AAP1	ML4 AH1	
	Bajo	DO3 FM1 ML7 DO6 FME4 DO5 SC2 MMC2	ML1 FH1 AHM3 ML3 DO1 AHM2 ML6 DO2 FME1 ML2 FH2 AH1 ML5 MMC1 AH4 FME5	FM2 FM3 DO4 AH2
		Bajo	Medio	Alto
		INCIDENCIA		

4.3.2.2. Identificación de los Eventos Inicantes. Esta fase se desarrolló usando principalmente los registros del portal de incidentes de la Gerencia del Complejo de Barrancabermeja y en algunas ocasiones los juicios del personal perteneciente al proceso. La identificación consistió en revisar registro a registro los hechos consignados en el portal de incidentes para un periodo de 2 años y determinar cuáles eventos se catalogaban como inicantes teniendo como premisa la falta de contención de masa y/o energía, y usando los hechos subsiguientes de las causas identificadas en la sección anterior. En este punto se identificaron 8 eventos inicantes en las unidades de Topping los cuales se consignan en la Tabla 7.

Tabla 7. Frecuencia de Ocurrencia de los Eventos Iniciantes Identificados en las Unidades de Topping de GCB

EVENTO INICIANTE	F	%
Liberación de Hidrocarburos Livianos (fase gaseosa)	118	39.7%
Escape Hidrocarburos (vapor)	48	16.2%
Derrame de Hidrocarburos (líquido)	40	13.5%
Sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas/tanques de recibo de producto	31	10.4%
Liberación de compuestos Corrosivos como el Ácido Clorhídrico (HCl)	20	6.7%
Liberación de energía	19	6.4%
Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	13	4.4%
Liberación de gases tóxicos como el H ₂ S y CO	8	2.7%
TOTAL	297	100%

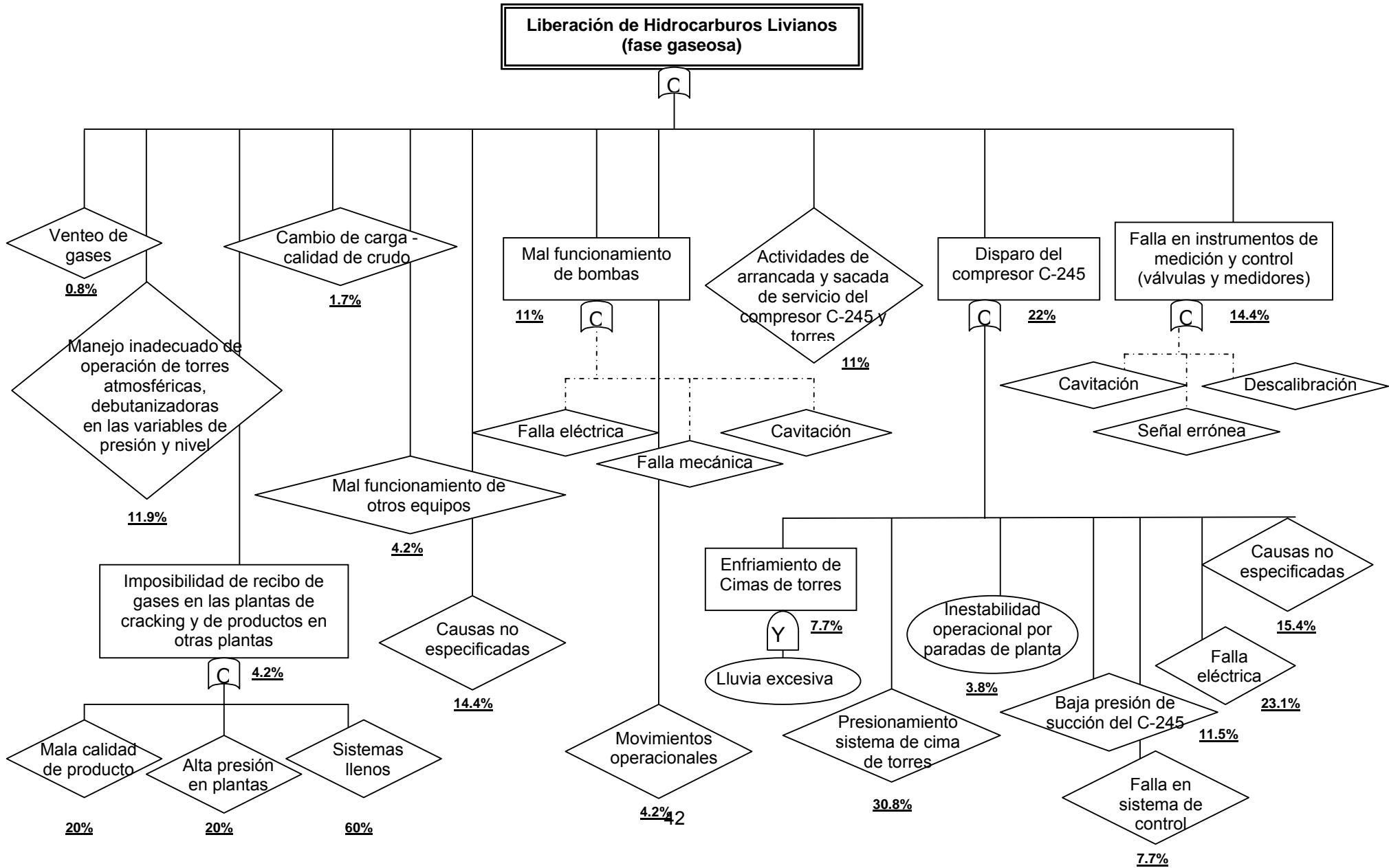
Una vez identificados los eventos iniciantes de interés se realizó un análisis cualitativo por Árboles de Falla, el cual consistió en asociar a los diferentes eventos iniciantes las causas que dieron su origen de acuerdo a lo registrado en el portal de incidentes.

La metodología básica que se usó en la elaboración de los Árboles de Falla consistió en ubicar en el tope del árbol el evento iniciante (texto en figura rectangular) e ir en forma descendente buscando las causas intermedias (texto en figura rectangular) hasta llegar a un nivel básico de causas (texto en circunferencia) o un nivel de causas no desarrollado (texto en rombos) ya sea por falta de información o por el alcance de la investigación. Las líneas punteadas que aparecen dentro de los árboles significan que las causas mencionadas se dan teniendo en cuenta los juicios de operadores pero no se encontraron evidencias en el portal de incidentes. Por último teniendo en cuenta que un evento se puede generar por causas necesarias o por causas suficientes, dentro de los árboles se especifican los conectores de acuerdo a si un evento es originado por causas simultáneas (conector y) o por cualquiera de un conjunto de causas independientes (conector o).

En este estudio, la cantidad de causas básicas encontradas es mínimo debido al poco detalle de los registros en el portal de incidentes, ya que en la mayoría solo se registra el evento final y no su origen. En las Figuras 11 a 18 se muestran los 8 árboles de falla para cada evento iniciante identificado, iniciando por los árboles cuyo evento tiene mayor ocurrencia dentro del periodo de tiempo analizado.

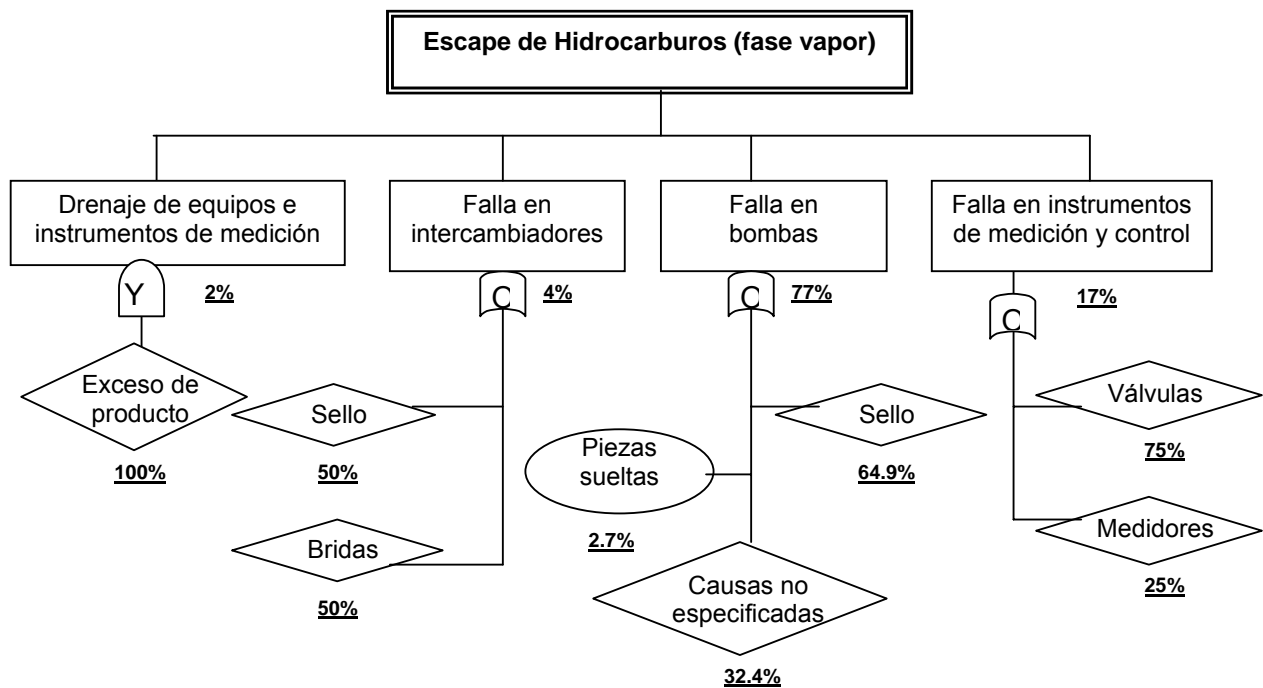
Por otro lado, en los árboles de falla se registra el porcentaje de participación de cada una de las causas intermedias, básicas y no desarrolladas dentro del evento inmediatamente superior con el fin de discriminar el peso de cada causa sobre los eventos iniciantes ya que no todas presentan la misma ocurrencia de tal manera que al multiplicar el total de cada evento iniciante mostrado en la Tabla 7 por el respectivo porcentaje de cada causa en el árbol de falla se puede encontrar la cantidad de veces que se presentó cada causa en el portal de incidentes.

Figura 11. E11: Liberación de Hidrocarburos Livianos (fase gaseosa)



La liberación de hidrocarburos livianos en fase gaseosa es el evento que tiene mayor frecuencia de ocurrencia en el portal de registros de incidentes y la causa que tiene mayor participación son las irregularidades en el comportamiento del compresor C-245 ubicado en la U-200, por ser el que recibe los gases de las torres de destilación atmosférica, debutanizadoras y preflash, por lo tanto cualquier falla o anomalía produce que dichos gases pierdan su destino y por tanto su única salida sea la tea que es el medio por el cual estos hidrocarburos son vertidos a la atmósfera. Las otras causas de mayor peso son el manejo inadecuado de la operación de las torres, la falla en instrumentos de medición y control, falla en bombas y actividades de arrancada y parada de equipos, al igual que un buen porcentaje de causas no identificadas (por falta de buenos registros de incidentes) que nublan las conclusiones finales de este evento.

Figura 12. E12: Escape de Hidrocarburos (fase vapor)



Respecto al escape de hidrocarburos en fase vapor el principal hecho que los produce son las fallas en las bombas, especialmente por fugas en los sellos, bridas, uniones, sin embargo se debe resaltar que nuevamente los instrumentos de medición y control son causante de eventos iniciantes. En la Tabla 8 se resume el porcentaje de escapes de los hidrocarburos amenaza en las unidades de destilación de crudo de acuerdo a las evidencias recogidas en el portal de incidentes de la refinería de Barrancabermeja. Igualmente se relaciona el porcentaje de incendios que se han desencadenado por el escape o derrame de estos hidrocarburos.

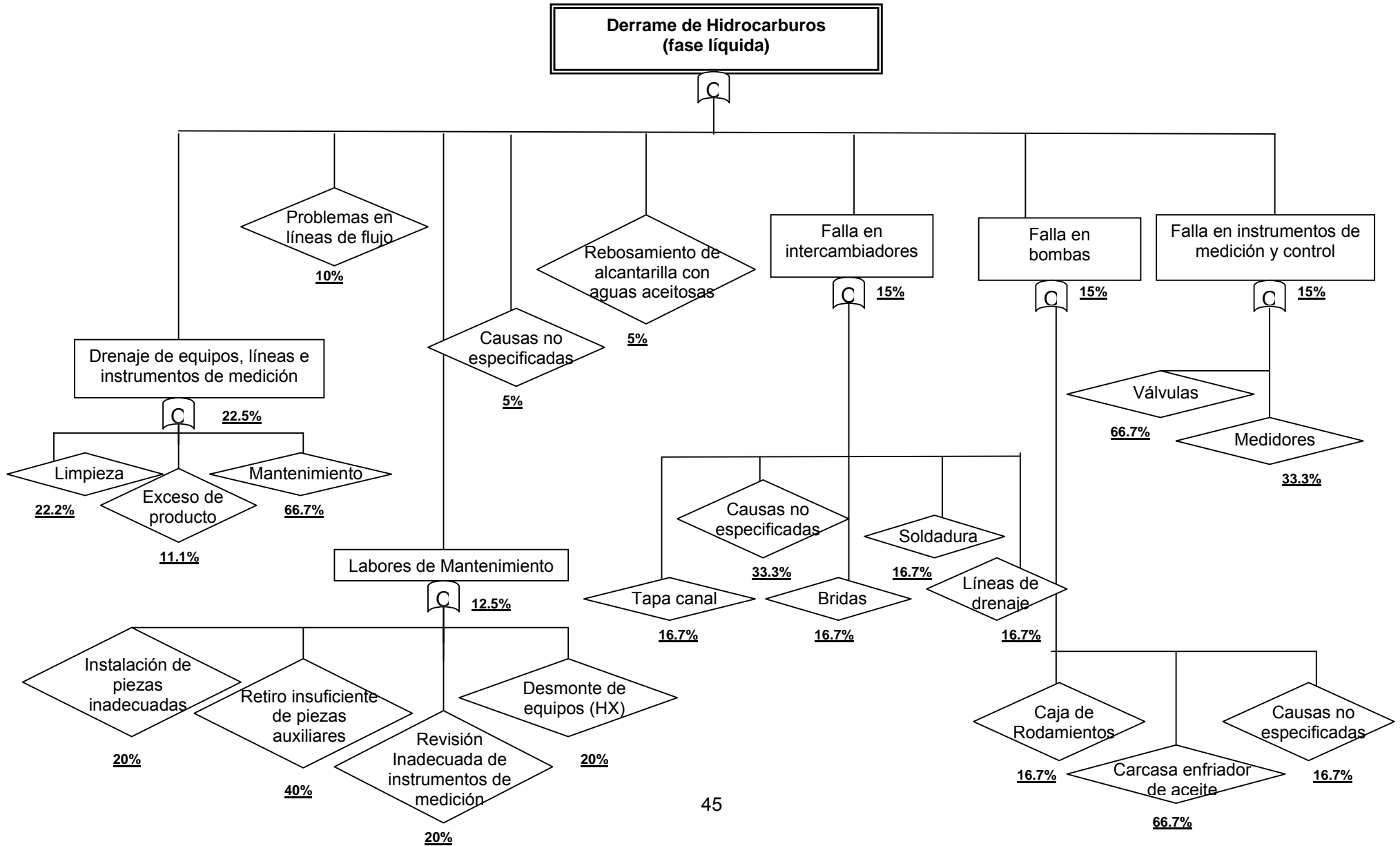
Tabla 8. Proporción de Derrames y Escapes de los fluidos identificados como Amenaza en las unidades de Topping

PRODUCTO	EQUIPO	DERRAMES	ESCAPES	TOTAL	INCENDIOS
Nafta	Torre Atmosférica	2.5%	8.3%	5.7%	0.0%
Jet	Torre Atmosférica	5.0%	4.2%	4.5%	4.8%
Diesel	Torre Atmosférica	0.0%	22.9%	12.5%	9.5%
Gasóleo Atmosférico	Torre Atmosférica	5.0%	2.1%	3.4%	14.3%
Crudo Reducido	Torre Atmosférica	7.5%	18.8%	13.6%	23.8%
Gasóleo Liviano Vacío	Torre Vacío	20.0%	18.8%	19.3%	9.5%
Gasóleo Pesado Vacío	Torre Vacío	27.5%	2.1%	13.6%	23.8%
Fondos de Vacío	Torre Vacío	10.0%	0.0%	4.5%	0.0%
Aceite	Bombas	7.5%	0.0%	3.4%	4.8%
Crudo	Otros equipos	5.0%	2.1%	3.4%	0.0%
Hidrocarburos	No definido	0.0%	14.6%	8.0%	9.5%
Aceite LivianoCiclo	No definido	7.5%	6.3%	6.8%	0.0%
Slurry	Otras unidades	2.5%	0.0%	1.1%	0.0%
TOTAL		100%	100%	100%	100%

En la Tabla 8 se puede notar que los fluidos en la sección de destilación atmosférica de interés en esta investigación por tener el mayor porcentaje de derrames y escapes son el Crudo Reducido, el Diesel y la Nafta. Esta información es útil, ya que permitió determinar cuáles son los circuitos o escenarios más críticos dentro de la torre de destilación atmosférica para el modelamiento de los eventos amenazantes en la sección de consecuencias (4.4). Los resultados de ocurrencia de derrames y escapes de los productos de vacío hace meritorio un estudio más detallado para un posterior modelamiento de eventos amenazantes en las torres de vacío pues estas torres no se encuentran dentro del alcance de esta monografía

Finalmente, se debe resaltar nuevamente que el porcentaje de hidrocarburos no especificados es alto y por tanto oculta información valiosa que podría afirmar las actuales conclusiones o refutarlas, por lo que se hace necesario modificar la forma de reportar incidentes para evitar esta pérdida de información.

Figura 13. E13: Derrame de Hidrocarburos (fase líquida)

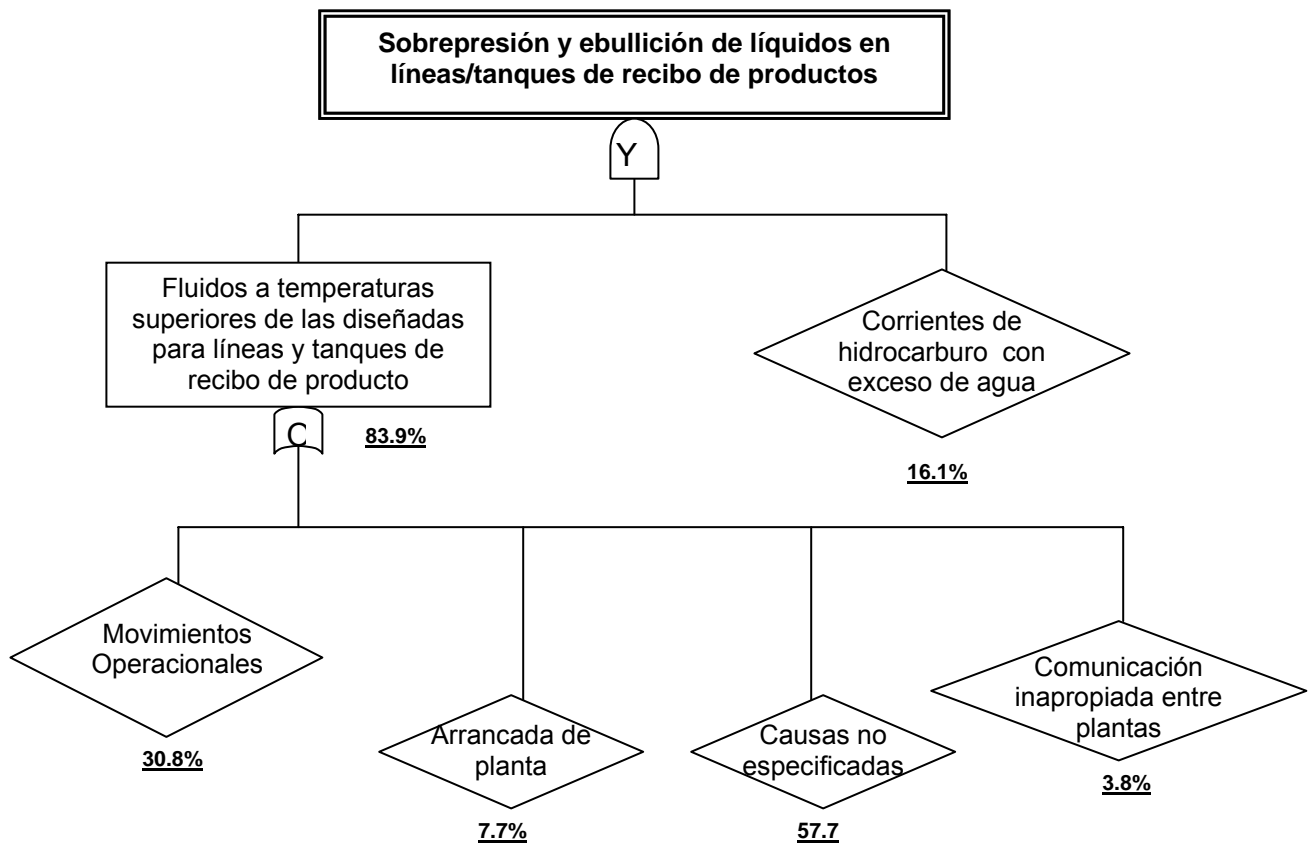


Como se ve en la Figura 13 el derrame de hidrocarburos líquidos se presenta principalmente por obras en la planta ya sea por mantenimiento, limpieza, drenaje de equipos e instrumentos, por tanto son puntos con un gran potencial de mejora que pueden reducir considerablemente la frecuencia ocurrencia de este evento iniciante de incendios. Por otro lado, en este árbol también se observa el alto porcentaje de los derrames por intercambiadores, bombas e instrumentos hecho que debe generar estrategias estrictas de control y revisión para dichos elementos de la planta que reduzcan la pérdida de contención de hidrocarburos.

Finalmente, aunque la cantidad de causas directas no especificadas no tienen un porcentaje alto (solo 5%), se siguen presentando dentro de otras causas como falla en intercambiadores un porcentaje considerable de 33.3% de causas no especificadas lo cual puede volver a enmascarar las conclusiones actuales de esta investigación.

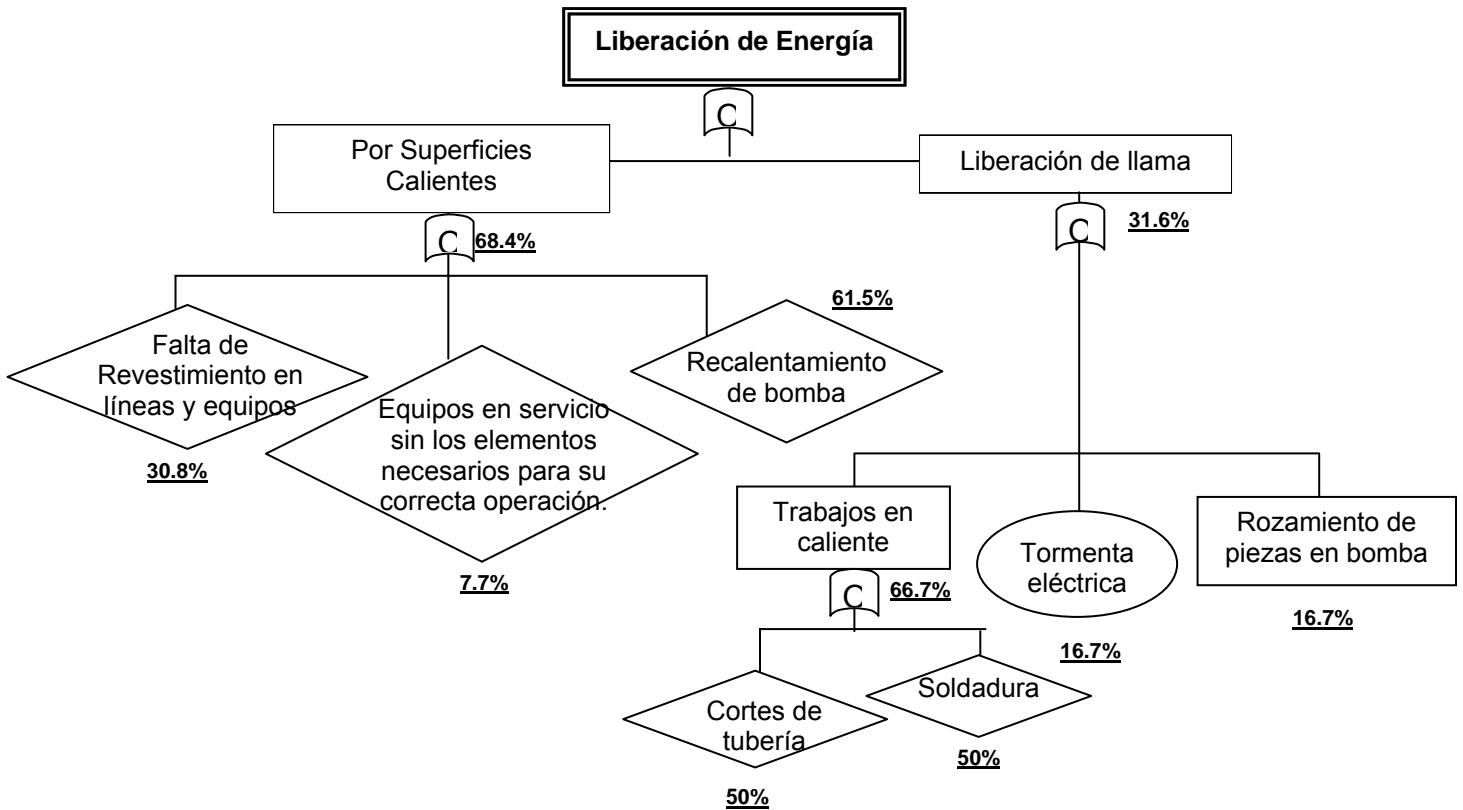
Junto con los escapes, en la Tabla 8 se resume el porcentaje de derrames de los hidrocarburos amenaza en las unidades de destilación de crudo de acuerdo a las evidencias recogidas en el portal de incidentes, encontrándose que en las torres atmosféricas la corriente que presenta mas derrames es el crudo reducido.

Figura 14. EI4: Sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas/tanques de recibo de producto



Este evento se encuentra relacionado con los fluidos que sobrepasan su límite de temperatura según ventanas operativas establecidas en refinería ya sea por restricciones de las líneas o de los tanques hacia donde se dirige la corriente. La violación de estas ventanas puede generar la ebullición del agua que está contenida en estas corrientes generando presionamiento, esfuerzos excesivos sobre los elementos y por ende debilitamiento de los materiales de construcción hasta el punto de generar roturas de líneas y/o tanques. Además del agua propia del proceso que va dentro de las corrientes, se encontró que en ocasiones su proporción dentro de las corrientes es demasiado alta contribuyendo aún más el problema antes mencionado.

Figura 15. E15: Liberación de energía

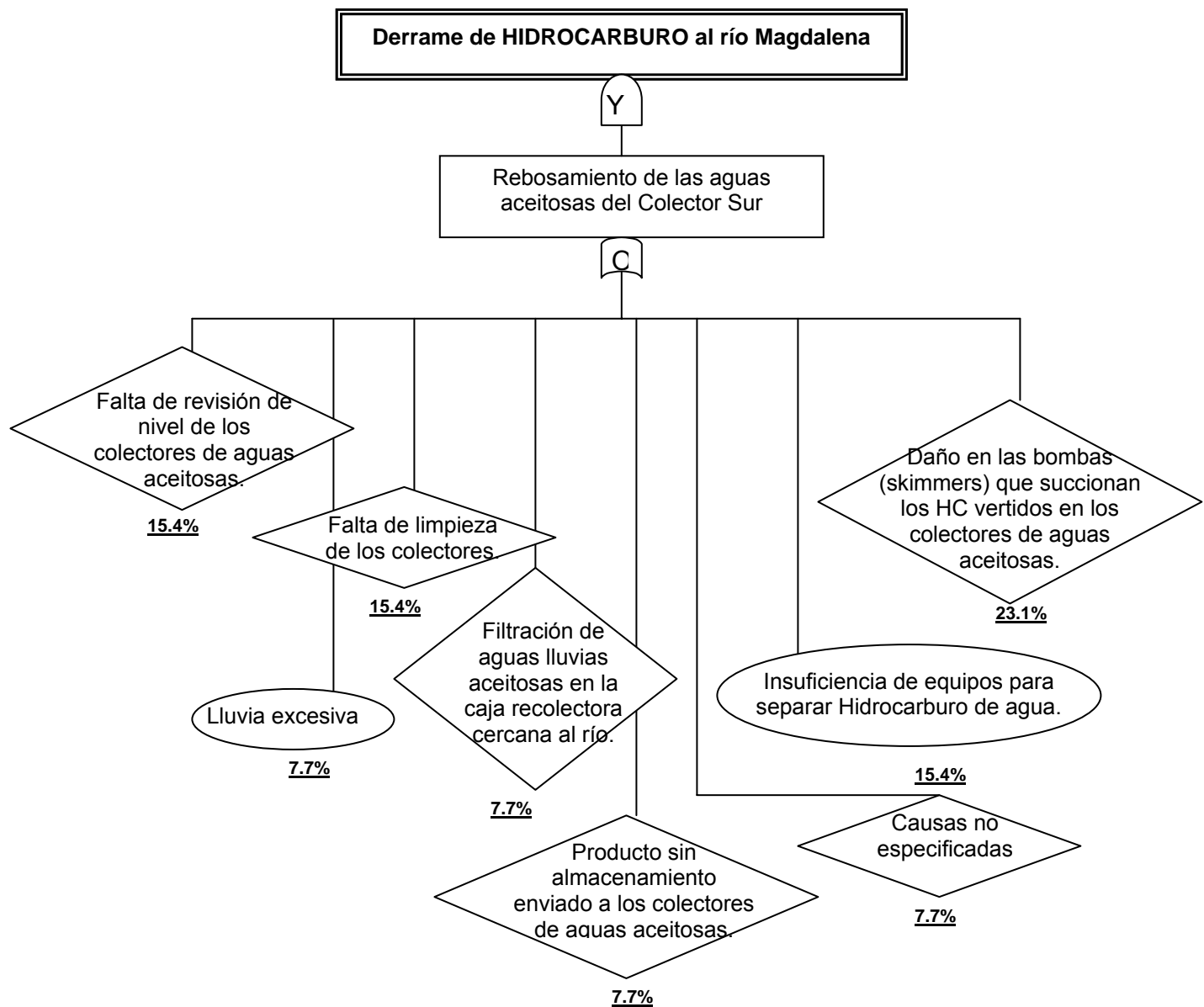


Respecto a la liberación de energía como fuente potencial de ignición se encontró que existen dos fuentes bien diferenciadas, las superficies calientes y la liberación de llama (chispas). La liberación de energía por superficies calientes puede ser una de las fuentes de ignición de derrames y/o escapes en las plantas, por tal motivo el registro de incidentes relacionado con este evento descubrió algunas de las potenciales fuentes de ignición, siendo el recalentamiento de las bombas (61.5%) y la falta de revestimiento de las líneas y equipos (30.8%) los factores predominantes. Cabe resaltar que en los reportes de incendios un gran porcentaje narra la ignición de revestimientos de líneas por lo que se podría pensar que dicho fenómeno se originó por la presencia de puntos calientes cercanos a la zona incendiada que en este caso pudieron ser sectores de líneas con ausencia de revestimientos.

Otro hecho a considerar sobre la liberación de energía es la posibilidad de lesionar a los trabajadores y visitantes de las plantas por contacto de dichas superficies, generando quemaduras y/o lesiones de mayor gravedad.

Por su parte la liberación de llama tiene que ver con la generación de chispas a través de trabajos en caliente como soldadura y cortes de tubería, estas operaciones fueron las causas que tuvieron el mayor porcentaje de participación en el registro de incidentes, aunque existen otras como las tormentas eléctricas y el rozamiento entre piezas que también pueden generar llama.

Figura 16. E16: Derrame de Hidrocarburo al río Magdalena

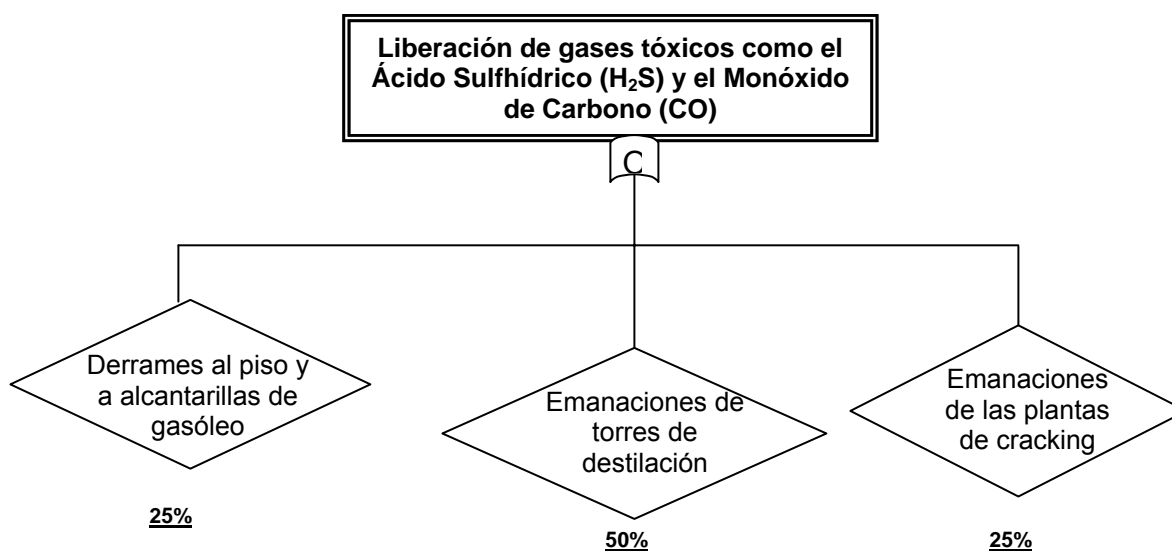


Los registros encontrados a cerca de derrames de hidrocarburos al río Magdalena relacionados con las unidades de Topping tienen que ver con el colector sur de aguas lluvias y aguas aceitosas ubicado a las orillas de este río.

Dentro de la unidad U-200 se encuentra un tanque separador de aguas aceitosas conocido como Wemco, el cual tiene la misión de hacer llegar la menor cantidad de hidrocarburo en su efluente hacia el colector sur, por tal motivo cuando las unidades de destilación de crudo producen un exceso de vertimientos de aguas aceitosas a las respectivas cajas recolectoras la capacidad de diseño del Wemco se pone a prueba y en muchas ocasiones no consigue satisfacer la necesidad generando exceso de hidrocarburo en el colector, que unido a las causas encontradas en el portal de incidentes produce el derrame de hidrocarburo al río, generando contaminación y una mala imagen de la empresa ante la comunidad en general.

Dentro de las causas encontradas en el portal se destaca la avería de los skimmers (23.1%), falta de revisión y limpieza del colector sur.

Figura 17. EI7: Liberación de gases tóxicos como el Ácido Sulfhídrico (H₂S) y el Monóxido de Carbono (CO)

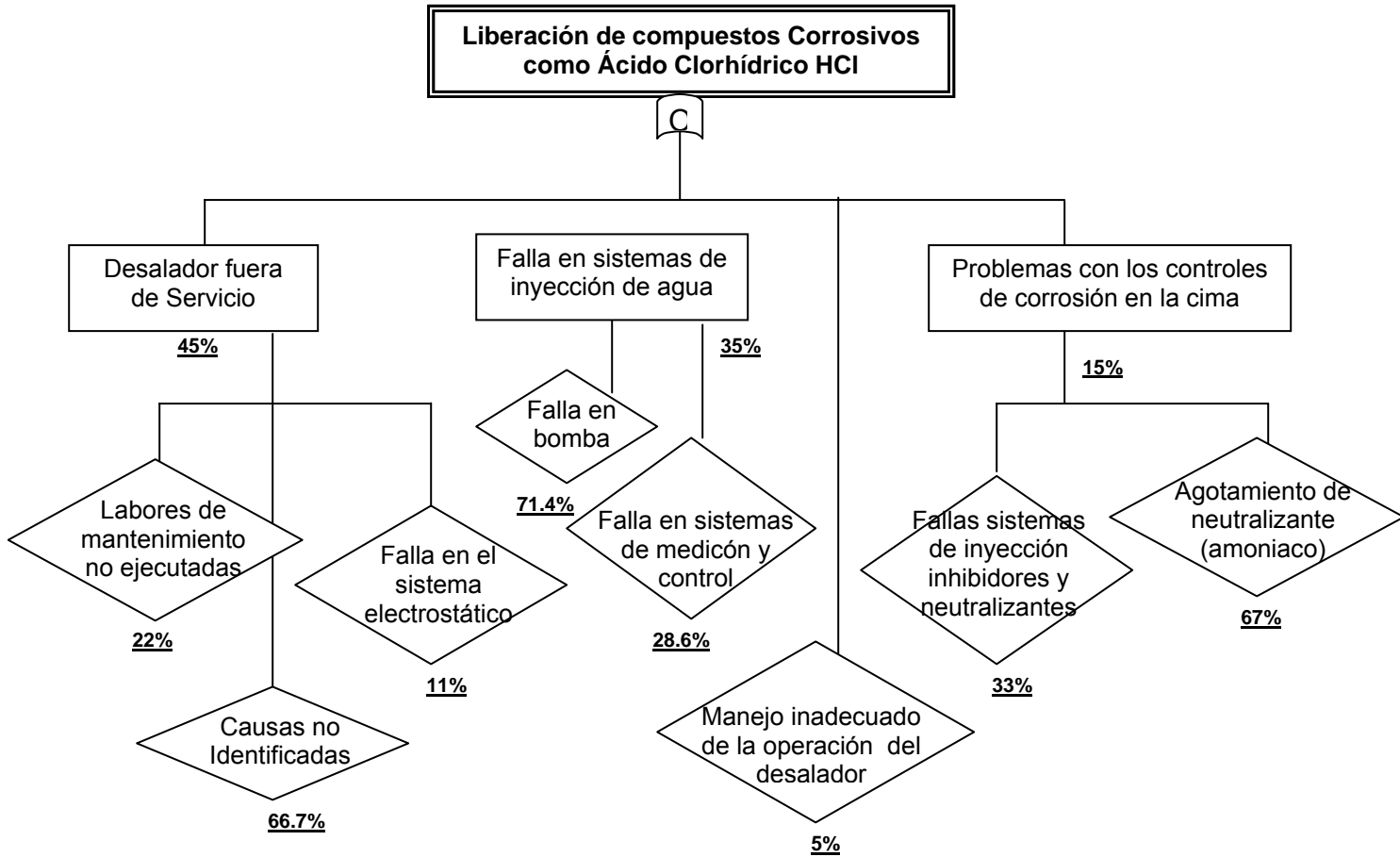


Dentro de una planta industrial que maneja hidrocarburos y específicamente petróleo crudo, la variedad de compuestos constituyentes genera a demás de la separación de los productos valiosos (Nafta, Jet, Acpm, etc.) emanaciones de sustancias tóxicas como el ácido sulfhídrico y el monóxido de carbono que liberados a la atmósfera tiene ciertas implicaciones para la salud de las personas expuestas.

Este hecho ha generado que en el portal de incidentes se registre presencia excesiva de dichas sustancias como amenaza para el personal de operaciones, sin embargo los reportes no dan un detalle de las razones sino indican la procedencia de las emanaciones siendo las propias torres de topping (atmosférica y de vacío) y las emanaciones de las plantas de cracking las de mayor frecuencia.

Se debe entender que el origen de estos gases se encuentra en el tipo de carga que cada unidad procese en especial a su contenido de azufre, por tanto para disminuir su presencia se debería controlar la calidad de crudo aunque es una medida ideal pues el bajo inventario de crudo de la refinería no da esa posibilidad. Por otro lado, se podría entrar a revisar si un posible rompimiento térmico en los hornos por las altas temperaturas en especial los de vacío ha generado un aumento de la concentración de estos gases en las plantas.

Figura 18. E18: Liberación de compuestos Corrosivos como Ácido Clorhídrico HCl



Cuando el proceso de desalado falla o se ve interrumpido o cuando los controles de corrosión en la cima presentan irregularidades, la acción de ácidos como el clorhídrico se agudiza y empieza a generar corrosión en las cimas de las torres y su línea de transferencia que finalmente deteriora el material de las estructuras ocasionando escapes de la corriente de cima.

Respecto a este fenómeno se encontraron evidencias de una gran permanencia de los equipos de desalado fuera de servicio (45% dentro de las causas reportadas) hecho que produce que el crudo ingrese a las torres de destilación con todas sus sales las cuales se hidrolizan liberando las sustancias corrosivas como el ácido

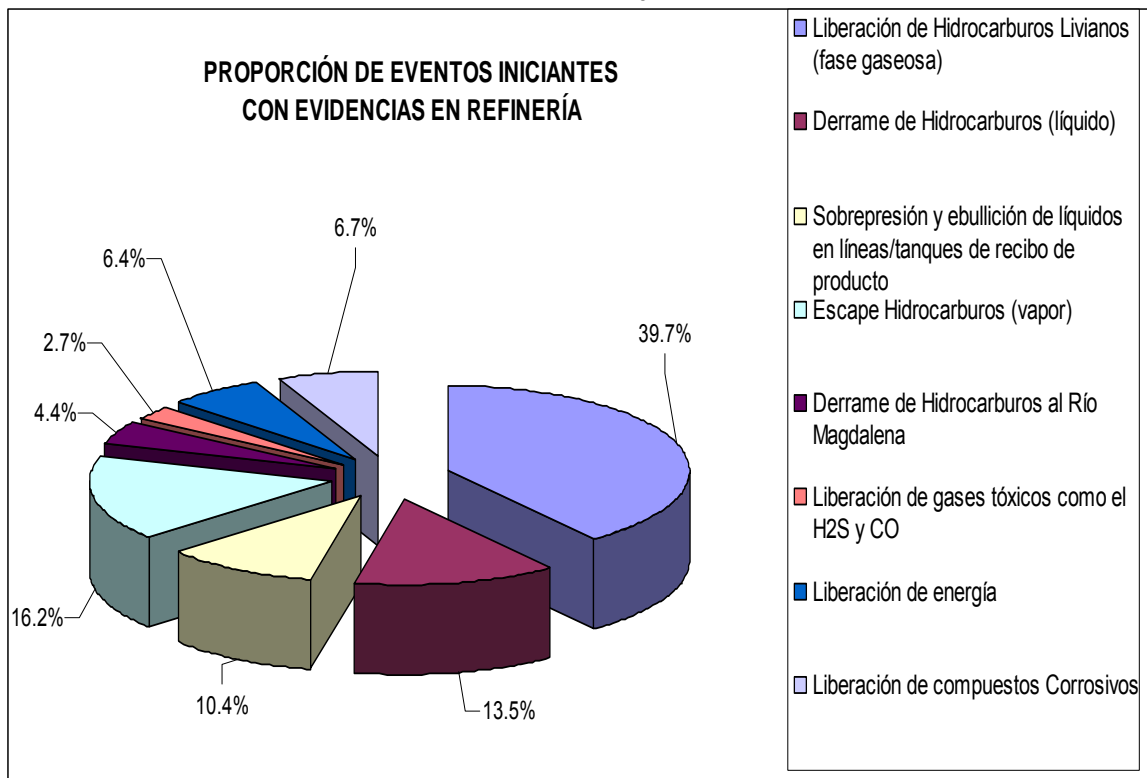
clorhídrico. Por otro lado, también se han encontrado pruebas a cerca de las fallas en la inyección de agua al desalador (35%) situación que genera que este sistema no realice su labor y por tanto suceda lo mismo que si este proceso estuviera fuera de servicio.

4.3.2.3. Estimación de Ocurrencia de Eventos Iniciantes. Una vez se identificaron los eventos iniciantes y sus causas, el siguiente paso consistió en determinar numéricamente la cantidad de veces que cada evento se presentó durante los 2 años comprendidos entre Septiembre 19 de 2003 y Septiembre 19 de 2005.

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 7 donde se puede ver un total de 297 incidentes relacionados con los 8 eventos iniciantes descritos en la sección anterior. Teniendo en cuenta esta cantidad se encontró que el evento que más se ha repetido durante los 2 años es la liberación de hidrocarburos livianos a la tea con un porcentaje de 39.7% sobre los 297 eventos totales. Por otro lado se confirma que los derrames y escapes tienen gran importancia en las plantas de este tipo especialmente por el manejo de equipos rotativos (bombas), estáticos (intercambiadores) y otras causas mencionadas en los árboles de falla.

Para hacer claridad sobre esta información la Figura 20 esquematiza la proporción de eventos iniciantes encontrados en el portal de incidentes de la GCB.

Figura 19. Proporción de Eventos Iniciantes detectados en la Refinería de Barrancabermeja

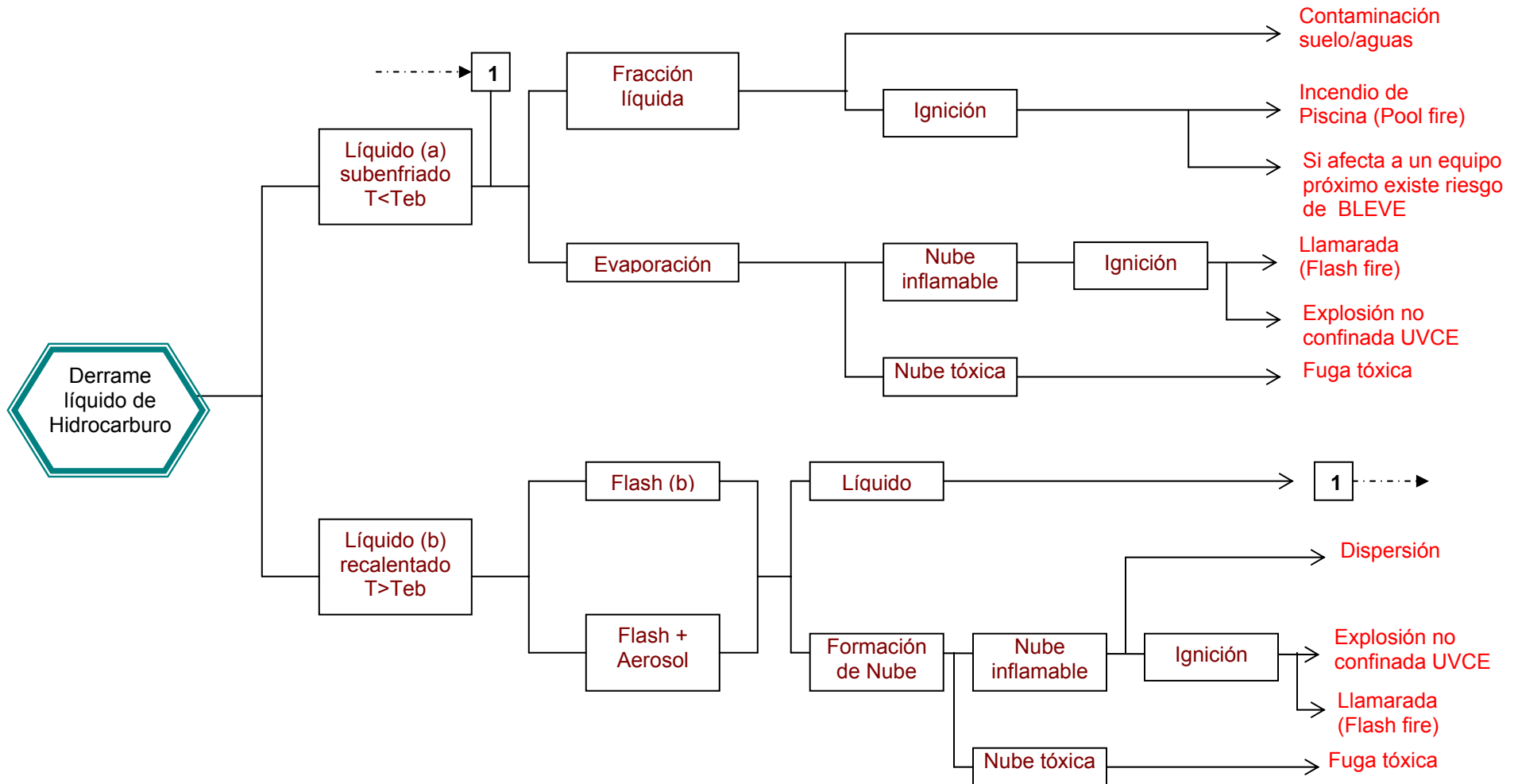


4.3.3. Eventos Amenazantes

4.3.3.1. Identificación y Selección de Eventos Amenazantes. Como se mencionó en la sección 3.2.2.1. de la metodología, una vez se identificaron los eventos iniciantes el siguiente paso fue desarrollar secuencialmente los hechos subsiguientes a la ocurrencia de cada evento iniciante encontrado.

Para ver el evento amenazante asociado a cada evento iniciante identificado se puede revisar la Tabla 9, en esta tabla se consigna el tipo de incendio desencadenado dependiendo del tipo de fluido fugado, es decir, para derrames de líquidos se tiene que los eventos amenazantes posibles son el incendio de piscina (pool fire) y el incendio de llamarada (flash fire), mientras que para el evento iniciante de escapes de vapores los incendios pueden ser tipo chorro de fuego (jet fire), y llamarada. Para entender mejor la posibilidad de ocurrir los tipos de incendios citados se tienen los esquemas de las Figuras 21 y 22, donde se explica secuencialmente el desarrollo de cada evento iniciante hasta llegar a los posibles eventos amenazantes.

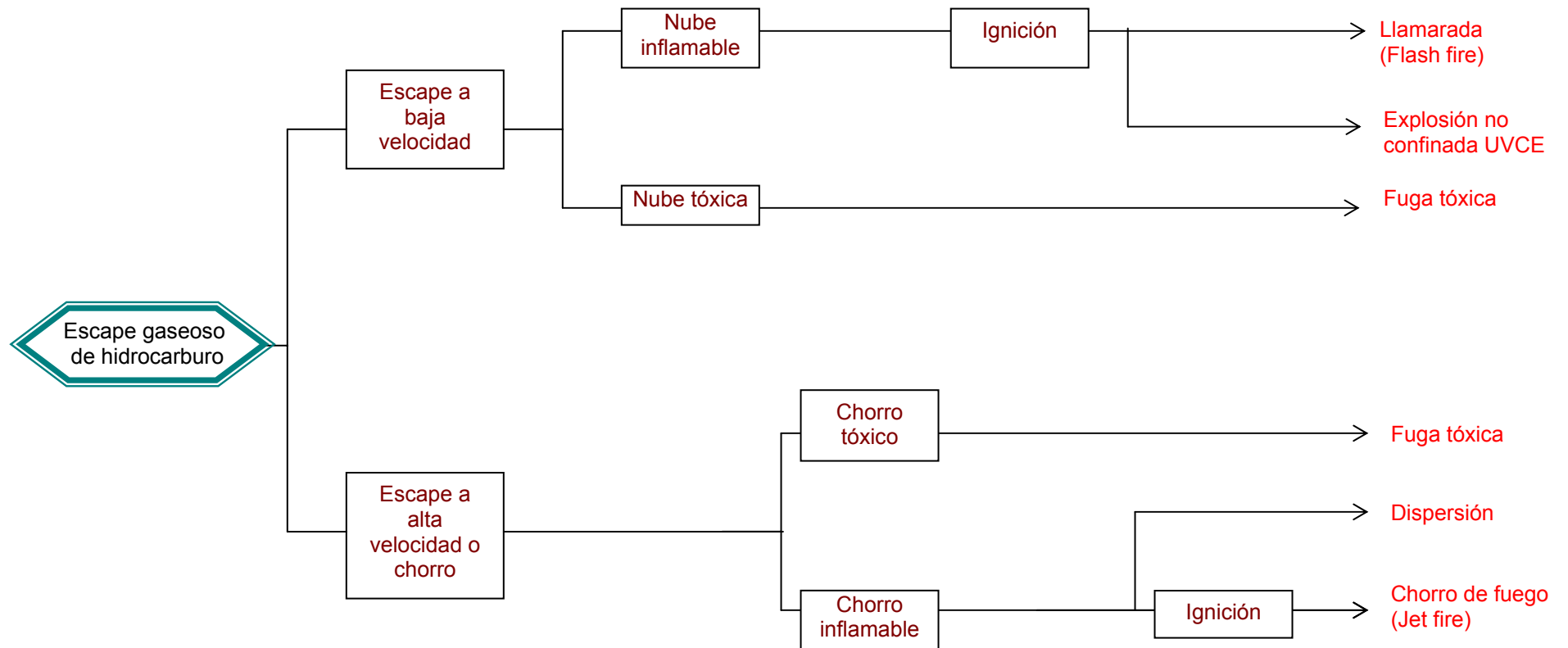
Figura 20. Árbol de Eventos para un Derrame de Hidrocarburo en Fase Líquida dentro de las Instalaciones de la Unidad de Destilación



(a) Si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) inferior a su punto de ebullición (T_{eb}), se produce un charco líquido que se evapora debido a la difusión de vapor a causa de la diferencia que existe entre la presión entre la presión del vapor en la superficie y en el ambiente. En cambio, si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) superior a su punto de ebullición (T_{eb}), sufre una vaporización instantánea (también denominada *flash*) debida al intercambio térmico con el substrato.

(b) Si se produce una vaporización instantánea de líquido, según la velocidad puede ocurrir el arrastre del líquido en la fase vapor (también denominado aerosol).

Figura 21. Árbol de Eventos para un Escape de Hidrocarburo en Fase Gaseosa dentro de las Instalaciones de la Unidad de Destilación



Con los eventos amenazantes identificados para derrames y escapes de hidrocarburos de las Figuras 21 y 22 se seleccionaron aquellos de mayor impacto y de posibilidad de ocurrencia de acuerdo a las condiciones necesarias de fuga y a la toxicidad de las sustancias en este estudio.

Respecto a los derrames líquidos de hidrocarburos los eventos amenazantes seleccionados fueron la piscina de fuego y la llamarada. La explosión de nube no confinada no se consideró ya que para el desencadenamiento de este hecho la masa de la nube de gas debe ser mayor a 1000Kg y de acuerdo a la curva de "Probability of Explosion" generada por Prugh, una nube de gas de masa 1000Kg tiene una probabilidad de explosión no confinada de 1%, por tanto se descartó de este estudio. Por otro lado, el evento de intoxicación por nube tóxica no se entró a analizar ya que es prioridad de salud ocupacional y no se encuentra dentro del alcance de esta monografía.

Para el escape de gas se contemplaron los eventos amenazantes de chorro de fuego y de llamarada, la aparición de explosión de nube confinada no se consideró por las razones ya expuestas al igual que la existencia de nube tóxica.

Por otro lado, además de los eventos amenazantes relacionados con incendios se detectaron vertimientos a la atmósfera y al río, fuentes de ignición, boil over por ebullición de agua en tuberías y tanques y se contempló la intoxicación por presencia de ácido sulfhídrico en el ambiente.

4.3.3.2. Estimación de Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes

Para determinar la frecuencia de ocurrencia de los eventos amenazantes se usaron los registros del portal de incidentes, encontrándose un total de 136 eventos amenazantes con evidencia en las Topping. Respecto a la liberación de hidrocarburos livianos, casi todos los incidentes reportados describían emisiones atmosféricas a través de las teas 1 y 2 de la refinería, por tanto la proporción de este evento amenazante es la que tiene el mayor porcentaje de participación (73.5%) dentro del total de eventos amenazantes desarrollados en las unidades de Topping, como se muestra en la Tabla 9.

Los incendios registrados en el portal de incidentes no tuvieron una descripción precisa del origen, tan solo citan el lugar donde se desarrollaron, y en la mayoría de dichos eventos su magnitud no sobrepasó el estatus de conato; sin embargo estos reportes permitieron dar una estimación de la frecuencia de ocurrencia de incendios en las plantas para el periodo analizado, y una posible clasificación del evento iniciante que los originó, es decir derrames o escapes con lo que se calcularon las frecuencias de ocurrencia registradas en la Tabla 9 para incendios de hidrocarburos líquidos (6.6%) e incendios de hidrocarburos en fase vapor (8.1).

Debido a que el evento iniciante denominado derrames de hidrocarburos al río Magdalena se consideró el mismo evento amenazante por su efecto de contaminación, todos los reportes relacionados se consideraron como eventos amenazantes de ahí que el 100% de los eventos iniciantes se convirtieran en eventos amenazantes como se muestra en la Figura 24.

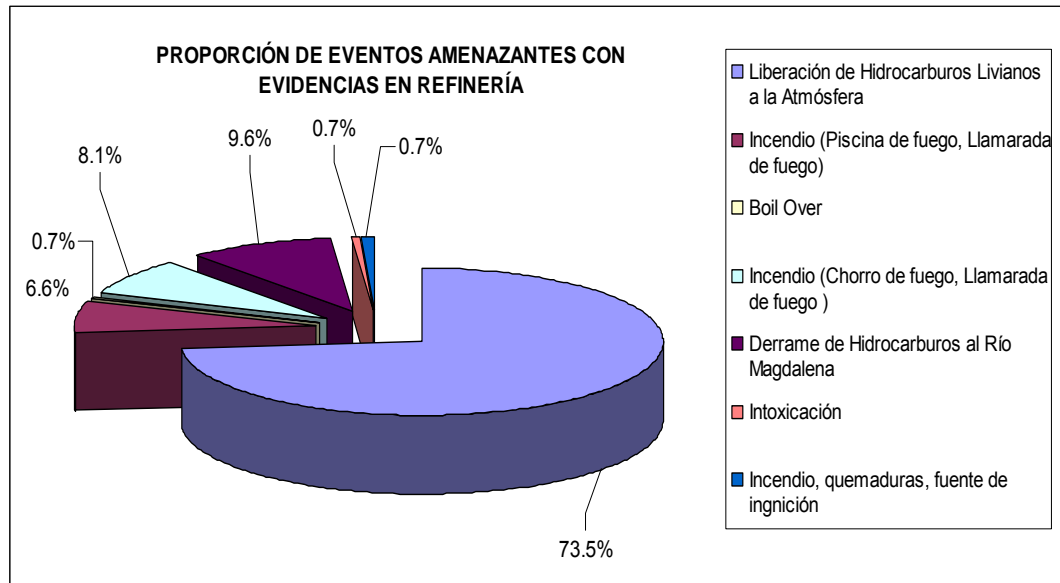
En refinería se encontró una evidencia de la generación de Boil over por alta temperatura de llegada de crudo reducido a un tanque de almacenamiento produciéndose rompimiento del mismo. Igualmente se encontró una evidencia de intoxicación de un operador por inhalación prolongada de sustancias tóxicas como el ácido sulfhídrico y otro con exposición a quemaduras por superficies calientes.

Tabla 9. Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes Asociados a los Eventos Inicianes identificados en las Unidades de Topping de GCB

EVENTO INICIANTE	EVENTO AMENAZANTE ASOCIADO	CANTIDAD	
		F	%
Liberación de Hidrocarburos Livianos (fase gaseosa)	Liberación de Hidrocarburos Livianos a la Atmósfera	100	73.5
Derrame de Hidrocarburos (líquido)	Incendio (Piscina de fuego, Llamada de fuego)	9	6.6
Sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas/tanques de recibo de producto	Boil Over	1	0.7
Escape Hidrocarburos (vapor)	Incendio (Chorro de fuego, Llamada de fuego)	11	8.1
Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	13	9.6
Liberación de gases tóxicos e inflamables como el H ₂ S y CO	Intoxicación	1	0.7
Liberación de Energía	Incendio, quemaduras, fuente de ignición	1	0.7
Liberación de compuestos Corrosivos	Corrosión que puede producir rotura de líneas que puede genera escapes/derrames y posteriores incendio/explosión	0	0.0
TOTAL	TOTAL	136	100

En la Figura 23 se muestra gráficamente la proporción de los eventos amenazantes y en la Figura 24 se esquematiza cuántos de los eventos iniciantes se han convertido en eventos amenazantes con consecuencias palpables en las unidades de destilación de crudo.

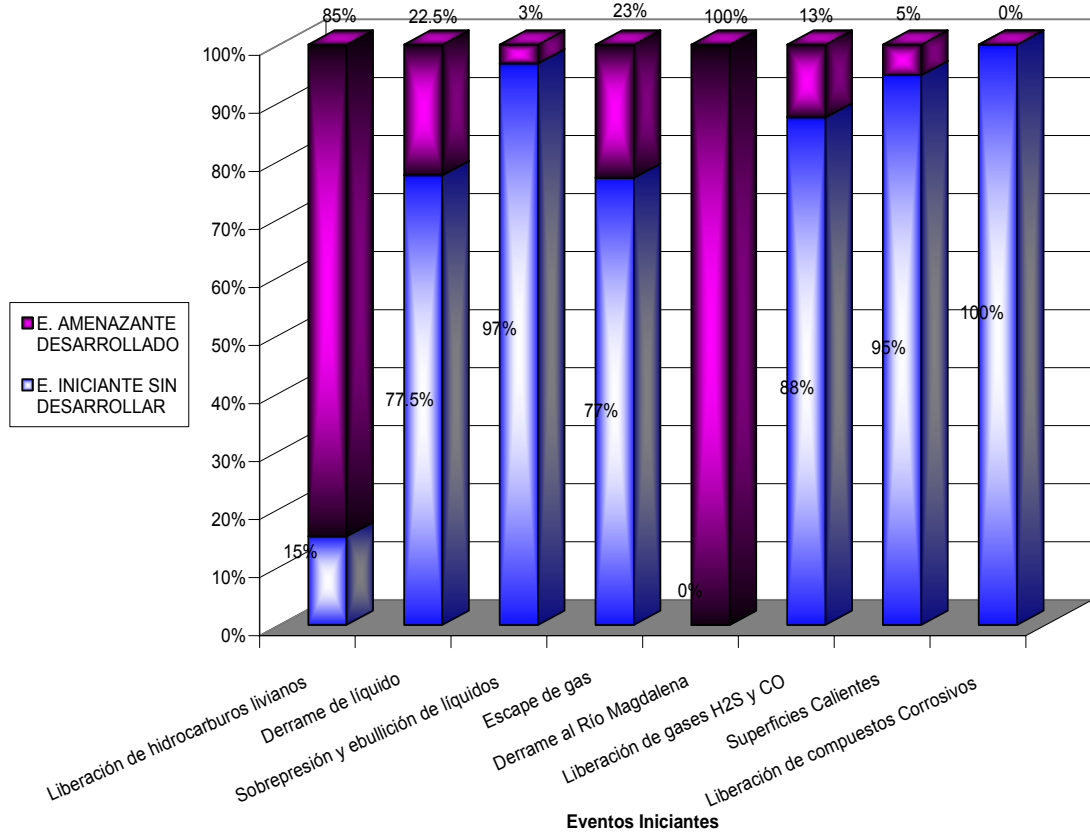
Figura 22. Eventos Amenazantes desarrollados en las Unidades de Destilación de la Refinería de Barrancabermeja



En la Figura 24 se observa que el 23% de los escapes de vapores se han convertido en incendios y que el 22.5% de derrames de líquidos también lo han hecho, por lo que la continua fuga de hidrocarburos se puede convertir en un gran riesgo tanto para personas como para los equipos dentro de las plantas si la magnitud de estas fugas se salen de proporción y si los mecanismos de control no mitigan los incendios desencadenados. Se aclara que en los reportes de los 2 años analizados todos los incendios que se produjeron fueron menores y/o conatos por lo que sus consecuencias fueron insignificantes comparadas con el potencial que tiene este evento amenazante como se verá en la sección 4.3. relacionada con el modelamiento de distancias de afectación por incendios. Por otro lado, la liberación de hidrocarburos a la atmósfera por las teas tuvo un 85% del total de liberación, ya que el restante 15% fue controlado por el recibo de gases en las plantas de cracking.

Finalmente, se debe realizar una observación respecto a la falta de pruebas sobre corrosión dentro de las torres de destilación, pues aunque no se hayan manifestado en este tiempo no significa que las causas mencionadas no estén generando lentamente daños en el material, aunque se puede pensar que los controles en las cimas son muy efectivos de ahí que este evento no se haya exhibido.

Figura 23. Proporción de eventos amenazantes desarrollados a partir de eventos iniciantes identificados en las unidades de Topping.



4.3.3.3. Identificación de Parámetros de Frecuencia para una Instalación

Una vez encontradas las frecuencias de ocurrencia de los eventos amenazantes para el periodo de 2 años (Tabla 9) el siguiente paso fue determinar los parámetros de frecuencia contextualizados a la planta industrial, para este fin se tomó como vida útil de la planta 30 años y la clasificación como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Frecuencia de Ocurrencia de Eventos Amenazantes para una Planta de Destilación de Crudo.

VALOR	NIVEL	CÓDIGO	FRECUENCIA
1	Improbable	I	Se presenta un (1) caso en la vida útil de la planta (30 años)
2	Remoto	R	Se presenta un (1) caso cada 10 años
3	Ocasional	O	Se presenta un (1) caso cada 5 años
4	Moderado	M	Se presenta un (1) caso cada 3 años
5	Frecuente	F	Se presenta un (1) caso cada 1 año

Con los niveles de calificación de la Tabla 10 se evaluaron todos los eventos amenazantes identificados en este estudio y los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Calificación de Frecuencia de Ocurrencia de los Eventos Amenazantes identificados en las Unidades de Topping

EVENTO AMENAZANTE	CÓDIGO	VALOR
Liberación de Hidrocarburos Livianos a la Atmósfera	F	5
Incendio (Piscina de fuego, Llamarada de fuego)	F	5
Incendio (Chorro de fuego, Llamarada de fuego)	F	5
Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	F	5
Boil Over	M	4
Intoxicación	M	4
Incendio, quemaduras, fuente de ignición	M	4
Corrosión que puede producir rotura de líneas que puede genera escapes/derrames y posteriores incendio/explosión	M	4

Todos los eventos amenazantes evaluados presentaron las calificaciones más altas debido a que su ocurrencia se determinó en un periodo de 2 años y todos durante este tiempo se presentaron más de una vez. Sin embargo, los eventos con mayor frecuencia fueron la liberación de hidrocarburos a la atmósfera, los incendios por líquidos y vapores y el derrame de hidrocarburos al río Magdalena. A los eventos principales se les valoró el riesgo a través de la Matriz RAM como se muestra en la sección 4.5.

4.4. ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS

Cuantificada la ocurrencia de los eventos amenazantes, la siguiente fase dentro del análisis/evaluación del riesgo consistió determinar las consecuencias generadas por los eventos. Para esto fue necesario dividir el análisis/evaluación de consecuencias en una serie de etapas que van desde la determinación de las zonas de afectación (por radiación térmica o sobrepresión), los corredores de protección, la estimación del porcentaje de daño a personas hasta una valoración de posibles pérdidas económicas si las consecuencias potenciales de los escenarios más críticos se desarrollaran.

4.4.1. Caracterización de escenarios a modelar.

Para determinar las zonas de afectación se seleccionaron 6 escenarios críticos dentro de la torre de destilación atmosférica T-201 perteneciente a la unidad U-200. Estos escenarios se seleccionaron teniendo en cuenta las 3 corrientes dentro de la torre que presentaron mayor cantidad de escapes y derrames, así como incendios dentro del análisis realizado a todas las unidades de Topping de Barrancabermeja. Estos fluidos fueron el Crudo Reducido que sale por el fondo de la torre, el Diesel o ACPM que sale de la torre despojadora T-202B una vez ha salido del plato 16 de la torre principal y la Nafta producto que sale del tanque acumulador -separador D-

201. Teniendo en cuenta que cada uno de estos fluidos determina un circuito dentro de la torre T-201 (Ver Sección 2.2.3.3.), para el modelamiento se escogieron los tramos de succión y descarga alrededor de las bombas que impulsan dichas corrientes pues son estos equipos los que presentan mayor incidencia de escapes y derrames dentro de las Topping. Para los tres productos, se manejaron escenarios con dos tipos de presión (Baja y media). En la Tabla 12 se resumen los eventos analizados en el modelamiento de la Torre T-201.

Adicionalmente a las condiciones propias del proceso, fue necesario en el modelamiento caracterizar los eventos de descarga, para lo cual se usaron 3 tamaños de orificio, los cuales son la aproximación más cercana de posibles roturas o fugas por elementos de las bombas de acuerdo a las experiencias de los expertos en Análisis de Riesgo del Instituto Colombiano del Petróleo:

- ✓ Fisuras menores (Pitting): por corrosión o por empaques, en este caso es muy posible que las roturas sean cortes longitudinales.
- ✓ Roturas medias (Hole): originadas en bridas o uniones que no están debidamente alineadas por el uso continuo (vibración) o roturas menores.
- ✓ Roturas mayores (Leak): pérdida de contención por sobrepresión de algún equipo.

Las variables de operación presentadas en la Tabla 12 corresponden a los valores reportados para las actuales condiciones de operación de la torre T-201. Estas variables son los datos de entrada para el modelamiento de los escenarios de eventos amenazantes, a través del software disponible para tal fin, en este caso PHAST PROFESSIONAL Versión 6.21.

En resumen se determinaron los corredores de protección para 18 escenarios generados por los 3 fluidos tanto en la succión como en la descarga de bombas y cada tramo bajo tres tamaños de descarga, bajo condiciones climatológicas de 30° C de temperatura y humedad relativa de 85%.

Tabla 12. Escenarios Modelados en PHAST para determinación de Distancias de Afectación por Eventos Amenazantes en la Torre T-201

UBICACIÓN	Producto	Rotura	Presión (PSI)	Temperatura (° F)	Diámetro Orificio** (pulg)
Línea de 6" de D-201 a bombas P-202C	Nafta líquida	Pitting (pequeña)	11.7	101	0.1
Línea de 6" de D-201 a bombas P-202C	Nafta líquida	Hole (Mediana)	11.7	101	0.5
Línea de 6" de D-201 a bombas P-202C	Nafta líquida	Leak (Grande)	11.7	101	1
Línea de 3" de P-202C/D a válvula FV225	Nafta líquida	Pitting (pequeña)	180	101	0.05
Línea de 3" de P-202C/D a válvula FV225	Nafta líquida	Hole (Mediana)	180	101	0.25
Línea de 3" de P-202C/D a válvula FV225	Nafta líquida	Leak (Grande)	180	101	1
Línea de 12" de líquido de torre a bomba P-225B	Crudo reducido	Pitting (pequeña)	17	668	0.1
Línea de 12" de líquido de torre a bomba P-225B	Crudo reducido	Hole (Mediana)	17	668	1
Línea de 12" de líquido de torre a bomba P-225B	Crudo reducido	Leak (Grande)	17	668	2
Línea de 8" de P-225B a válvula LV-201	Crudo reducido	Pitting (pequeña)	160	668	0.1
Línea de 8" de P-225B a válvula LV-201	Crudo reducido	Hole (Mediana)	160	668	0.5
Línea de 8" de P-225B a válvula LV-201	Crudo reducido	Leak (Grande)	160	668	1
Línea de 6" de despojador a bomba P-204C	Diesel líquido	Pitting (pequeña)	16	530	0.1
Línea de 6" de despojador a bomba P-204C	Diesel líquido	Hole (Mediana)	16	530	0.5
Línea de 6" de despojador a bomba P-204C	Diesel líquido	Leak (Grande)	16	530	1
Línea de 8" de P-204C a válvula FV-208	Diesel líquido	Pitting (pequeña)	157	530	0.1
Línea de 8" de P-204C a válvula FV-208	Diesel líquido	Hole (Mediana)	157	530	0.5
Línea de 8" de P-204C a válvula FV-208	Diesel líquido	Leak (Grande)	157	530	1

** Corresponde al tamaño del orificio de liberación de producto.

4.4.2. Determinación de las zonas de afectación.

Cada evento amenazante genera un efecto el cual posee una magnitud, así un incendio produce radiación térmica, una explosión produce sobrepresión, en dispersión ocurre diluciones de nube tóxica o inflamable. Todos estos valores pueden ir desde un valor máximo, hasta un valor de cero, en el cual los efectos son imperceptibles, sin embargo como los corredores no pueden ser infinitos, ya que darían afectaciones grandísimas y sobrevaloradas, se debe establecer un límite en el nivel de efecto, para así poder establecer distancias que siendo conservativas, no determinen corredores exagerados y sobrevaloración de pérdidas. La extensión de la zona de afectación según un evento amenazante está limitada por los niveles de efectos generados (radiación térmica, concentración de nube, sobrepresión), por lo cual se establecieron unos niveles de interés de efectos con los cuales se calcularon las distancias de afectación. Es importante destacar que los eventos amenazantes a modelar fueron incendios y por tanto el único efecto de interés es la radiación térmica.

4.4.2.1. Zonas de Afectación por Incendio. Las zonas de interés se determinaron con base en los efectos que puede tener la radiación térmica del incendio sobre personas y bienes, estas dependen tanto de la intensidad como del tiempo de exposición a la radiación térmica. Las zonas de protección y afectación, las cuales se emplean en la planeación de la emergencia por cualquier evento que genere radiación térmica, se resumen en la Tabla 13 y gráficamente en la Figura 25.

Los tiempos de exposición que ocasionan quemaduras de primero, segundo y tercer grado, están dados para personas expuestas a la radiación térmica sin ningún tipo de protección de acuerdo a la Tabla 13.

4.4.2.2. Zonas de Afectación por Lllamarada. Los efectos originados por la llamarada son de radiación térmica, causados principalmente por el contacto directo de la llama con la persona ubicada dentro de los límites de inflamabilidad de la nube de vapor. Para tal fin, se establece que la nube de vapor puede incendiarse hasta un límite máximo desde el punto de fuga, dado por la distancia a la cual la concentración de la nube se ha diluido en el límite inferior de inflamabilidad del producto (L.I.I). La anterior zona considera la muerte de todas las personas presentes, ya que la radiación producida por la llamarada de un hidrocarburo (superiores a 170 KW/m^2), es suficiente para causar muerte instantáneamente.

Los niveles de afectación y protección por eventos de llamarada se resumen en la Tabla 14 y Figura 26.

Tabla 13. Zonas de Afectación por Radiación Térmica

RADIACIÓN TÉRMICA (KW/m²)	CONDICIONES
> 37.5	Intensidad suficiente para causar daño a equipos de proceso.
> 25	Zona de probabilidad de 50% de muerte para tiempos de exposición mayores de 30 segundos.
9.50 - 12.50	Al interior de esta área, existe ignición de la madera sometida al flujo de calor durante un tiempo excesivo. Intensidad suficiente para fundir tuberías de plástico. Puede desarrollar fatalidad debido a quemaduras de tercer grado después de 100 segundos de exposición. Quemaduras de segundo grado después de 12 segundos de exposición.
7.5 – 9.50	Intensidad calórica que permite que la exposición se limite a algunos segundos, suficiente para escapar.
5 – 7.5	Zona de probabilidad de 1% de muerte para tiempos de exposición mayores de 60 segundos. Tiempo de exposición máximo de 1 minuto con ropa de protección adecuada. Quemaduras de primer grado después de 30 segundos de exposición. Quemaduras de segundo grado después de 180 segundos de exposición. Las consecuencias estimadas del accidente producen un nivel de daño que justifica la aplicación inmediata de las medidas de seguridad.
1.6 - 5	Tiempo de exposición máximo de 3 minutos sin ropa de protección adecuada. Quemaduras de primer grado después de 120 segundos de exposición. Las consecuencias a este nivel del accidente provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención inmediata de las medidas de protección sobre las personas. Zona límite de intensidad calórica en áreas donde pueden emplearse acciones de emergencia que duren hasta varios minutos por personal con ropa adecuada.
< 1.6	En esta zona no se producen daños por exposición prolongada. Zona exterior que corresponde al área para establecer los cordones de protección.

FUENTE: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. American Institute of Chemical Engineering. New York, Página 268. Enero de 2000.

Figura 24. Zonas de Afectación por Incendio

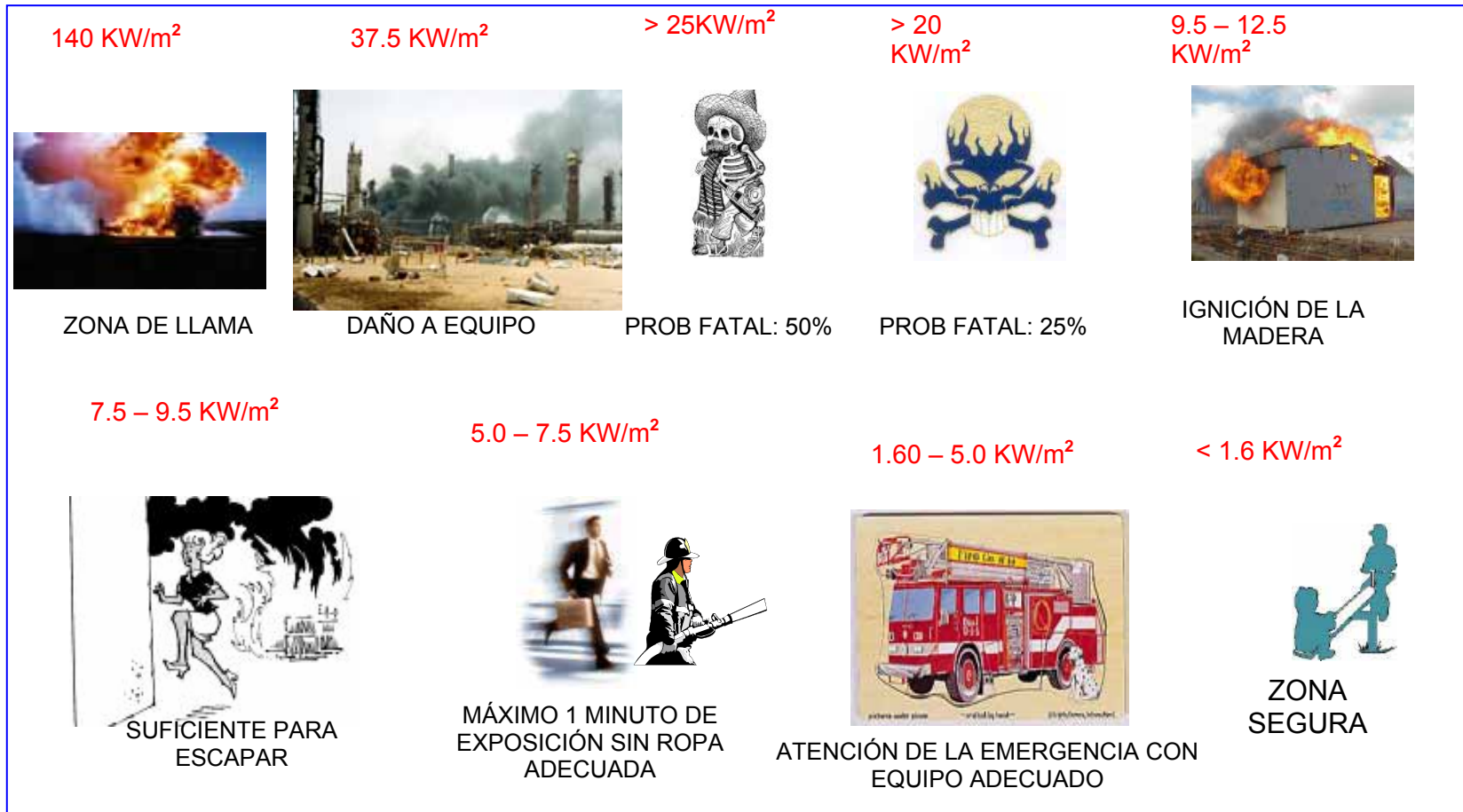
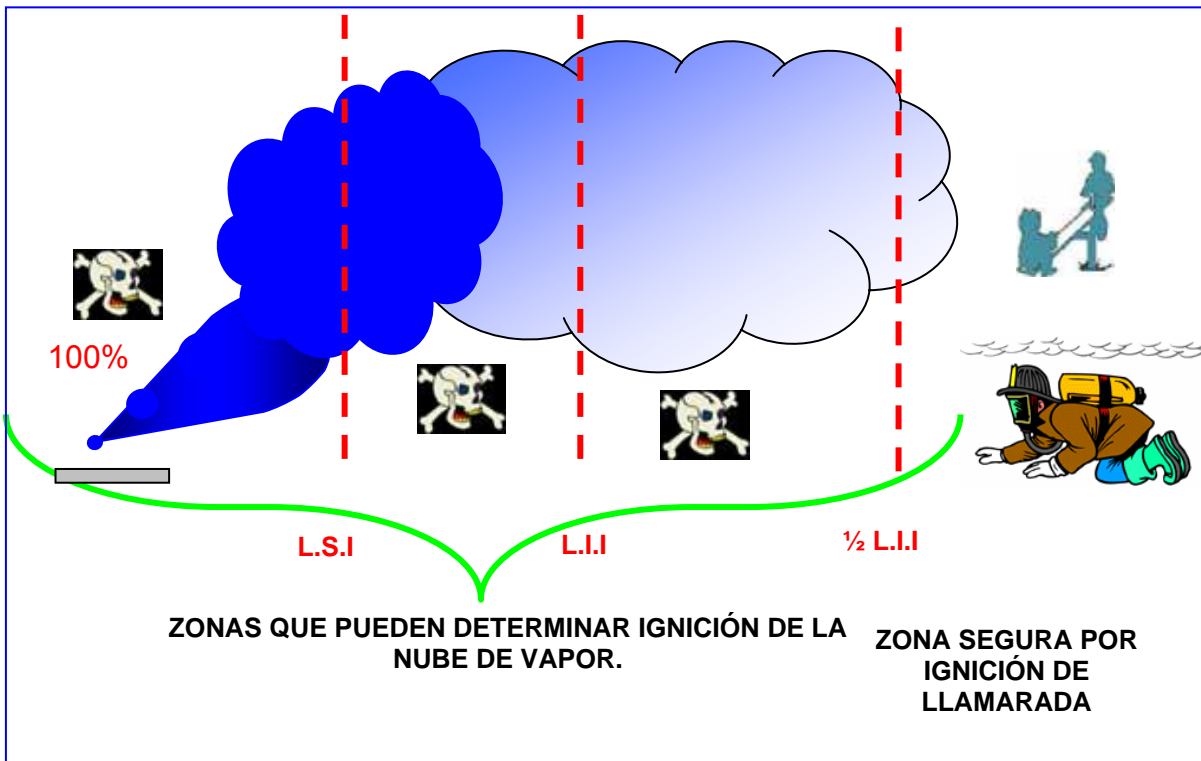


Tabla 14. Zonas de Afectación por Llamarada

ZONA	DESCRIPCIÓN
Zona con concentración de nubes de vapor superiores al L.I.I.	Zona en la cual no deben existir fuentes de ignición, se asume 100% la probabilidad de muerte de una persona, siempre y cuando este en la dirección del viento.
Zona Segura	Concentraciones por debajo del límite medio de inflamabilidad. Se asume que en esta zona ya no hay probabilidad de ignición de la nube.

Figura 25. Zonas de Afectación por Incendio de Nube (Llamarada)



4.4.3. Determinación de Corredores de Afectación.

El modelamiento de consecuencias de los eventos amenazantes por efectos inflamables, se realizó con el software para estimación de consecuencias PHAST Professional versión 6.21 propiedad de DNV Technica, licencia corporativa de ECOPETROL.

Es importante mencionar que la mayoría de los escenarios modelados aquí, consideran situaciones desfavorables en las cuales los sistemas de control y seguridad no actúan; adicionalmente cada evento se calculó bajo condiciones muy

conservativas, donde las condiciones de operación, siempre son las máximas y el tipo de descarga considerado siempre es el de mayor efecto.

Para descarga continua se consideró un tiempo de liberación de 5 minutos. Los corredores de afectación y protección son medidos a partir del punto de fuga del elemento considerado en el escenario y en dirección del viento, y serán empleados posteriormente, en la evaluación del posible daño causado. Para el evento chorro de fuego las distancias modeladas son longitudes a partir de la fuente del escape en dirección del viento, para piscina de fuego las distancias calculadas son radios por lo cual las consecuencias se presentarán en un círculo cuyo radio es el determinado por PHAST. Finalmente para llamarada la distancia determinada es aquella en la cual la nube de gas se puede encender provocando la muerte para cualquier persona y la destrucción total de equipos.

Las Tablas 15 y 16 presentan los corredores de protección calculados para los eventos que involucran la generación de Radiación térmica por incendios de piscina y chorro y para Llamarada. Dentro de la Tabla 15 es importante tener en cuenta las siguientes aclaraciones:







- NA: No se alcanza estos niveles de radiación térmica.
- D/L/R: Diámetro de piscina ó Longitud del Chorro ó radio de la Blevé. NO: No ocurre este evento.
- Para efectos de atención a cualquier emergencia se aconseja tomar en cuenta las distancias dadas por la afectación cuyo intervalo de radiación es de (1.6 a 5 KW/m²).
- Los corredores para tanques de almacenamiento y diques son medidos a partir del centro del tanque.
- El nivel de radiación de 37.5 KW/m² en tanques se tomaron a nivel de la altura del tanque, esto con el objeto de evaluar su incidencia sobre equipos a similar altura.
- Cuando las distancias por radiación térmica se repiten es porque en esa zona hay presencia de llama, la cual involucra todos los niveles de radiación.

Finalmente, para dar claridad a los resultados de la Tabla 15 se tiene la Figura 26 donde se explica la nomenclatura usada.

Tabla 15. Corredores de protección Modelados en PHAST para los Escenarios críticos de la Torre T-201

I.D	ESCENARIO	PRODUCTO	ORIFICIO (PULG)	EVENTO	DISTANCIA SEGURA (m) SEGÚN NIVEL DE RADIACION TERMICA KW/m2						
					D/L/R	< 1.6	1.6 -5	5-7.5	7.5-9.5	>25	>37.5
1	Línea de 6" de D-201 a bombas P-202C	Nafta	0.1	Piscina	9.1	11.7	10.4	10.1	9.9	9.2	8.6
			0.5	Chorro	34.7	53.5	43.3	40.5	38.8	34.7	34.7
			1	Chorro	61.6	98.2	78.9	74.2	71.4	61.6	61.6
2	Línea de 3" de P-202C/D a válvula FV225	Nafta	0.05	Chorro	7.8	11.3	9.2	8.5	8.2	7.8	7.8
			0.25	Chorro	30.1	48.4	39.0	36.5	35.2	30.1	30.1
			1	Chorro	96.7	163.6	132.0	123.6	119.1	100.1	96.7
3	Línea de 12" de líquido de torre a bomba P-225B	Crudo reducido	0.1	Chorro	1.2	2.1	1.7	1.6	1.6	1.3	1.3
			1	Chorro	9.3	18.5	14.5	13.5	12.9	11.3	10.8
			2	Chorro	17.1	35.1	27.3	25.4	24.4	21.2	20.2
4	Línea de 8" de P-225B a válvula LV-201	Crudo reducido	0.1	Chorro	9.9	15.3	12.8	12.1	11.8	10.2	9.9
			0.5	Piscina	40.6	66.4	54.7	51.8	50.2	44.5	41.4
			1	Chorro	11.2	39.4	24.5	19.4	15.6	6.5	5.9
5	Línea de 6" de despojador a bomba P-204C	Diesel	0.1	Chorro	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
			0.5	Chorro	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
			1	Chorro	9.6	17.8	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
6	Línea de 8" de P-204C a válvula FV-208	Diesel	0.1	Chorro	11.6	18.0	15.0	14.1	13.7	11.6	11.6
			0.5	Chorro	46.3	76.8	62.7	59.2	57.3	48.9	46.3
			1	Chorro	83.7	142.4	115.9	109.3	105.7	92.5	85.5

Figura 26. Código de Colores para las Zonas de Afectación por Radiación Térmica.

DESCRIPCION	
	(< 1.6) Zona Segura.
	(1.6 -5) Permite realizar acciones de control cortas.
	(5 - 7.5) Quemaduras de 1° por corta exposición.
	(7.5 - 9.5) Intensidad suficiente que permite alejarse.
	(> 25) Probabilidad de muerte del 50%.
	(> 37.5) Deterioro total de equipos.

Las distancias reportadas en la Tabla 15 son las mínimas para que cualquier persona o elemento de la planta no sufra daño por la intensidad de radiación térmica.

4.4.4. Estimación de porcentaje de daño o Vulnerabilidad.

El siguiente paso a una estimación de consecuencias para el análisis de riesgo es determinar los posibles daños causados por los eventos amenazantes.

De acuerdo al objeto de este estudio se estimaron los efectos sobre las personas teniendo en cuenta quemaduras de primero y segundo grado y fatalidades, respecto a las consecuencias sobre equipos se expresaron en términos de pérdidas económicas por efecto de la reposición por daño total de los elementos de la planta.

4.4.4.1. Daño sobre Personas (Modelos de Vulnerabilidad PROBIT)

Para esta investigación la evaluación de la vulnerabilidad sobre personas se realizó mediante el Modelo PROBIT por ser el de mayor utilidad en literatura para calcular la intensidad de los eventos amenazantes debido a radiación térmica.

El modelo PROBIT evaluó las distancias en las cuales se alcanzan porcentajes o probabilidades de afectación del 99, 50 y 1% por exposición de 30 segundos a la radiación térmica de los incendios provocados por los 5 escenarios de la Tabla 15 que presentaron las distancias de los corredores de protección más grandes dentro de todos los escenarios modelados de la torre T-201. El resumen de esto escenarios se muestra en la Tabla 15.

Tabla 16. Resumen de los eventos Amenazantes con mayor Distancia de Afectación modelados en PHAST

D KW/m ²	Chorro de Nafta		Piscina de CRED	Chorro de Diesel	
	Succión	Descarga	Descarga	Descarga	Descarga
	1 pulg	1 pulg	0.5 pulg	0.5 pulg	1 pulg
1.6	98.2	163.6	66.4	76.8	142.4
5	78.9	132	54.7	62.7	115.9
7.5	74.2	123.6	51.8	59.2	109.3
9.5	71.4	119.1	50.2	57.3	105.7
25	61.6	100.1	44.5	48.9	92.5
37.5	61.6	96.7	41.4	46.3	85.5

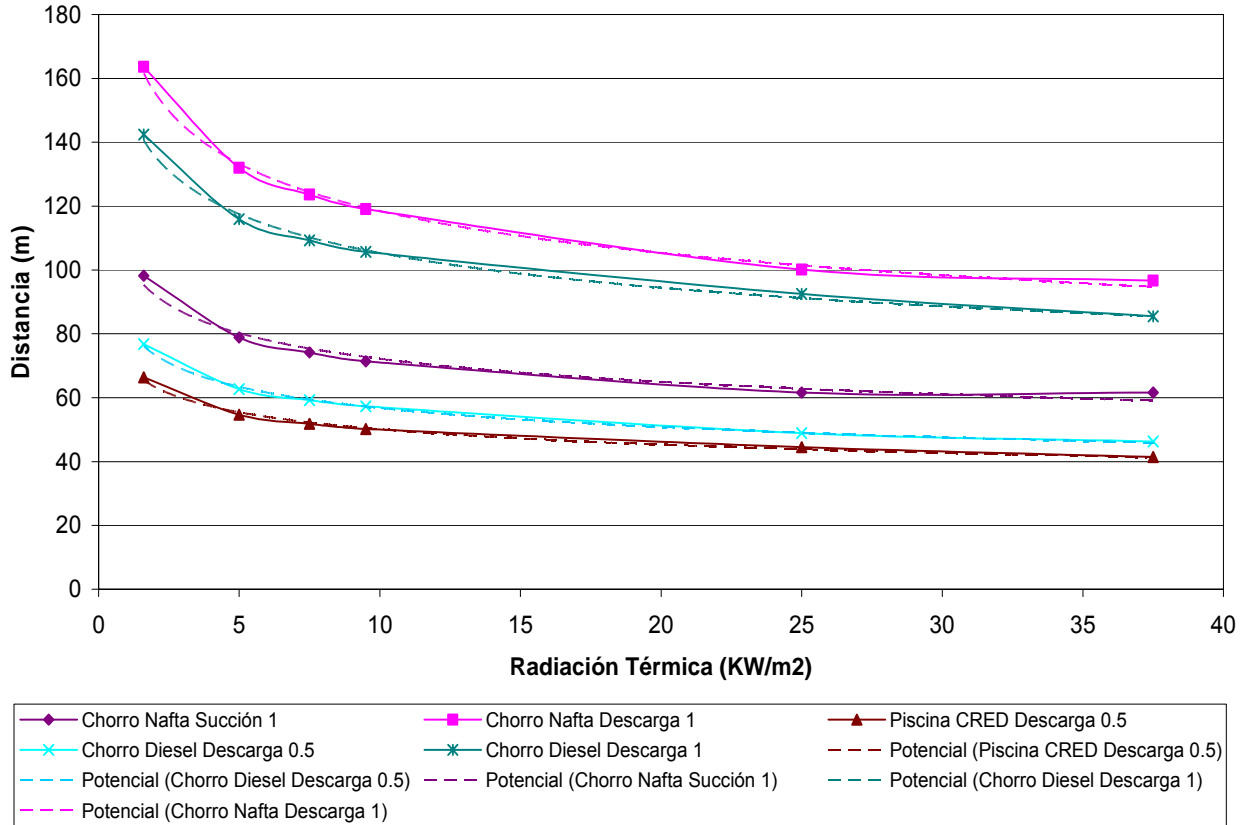
Por su parte, en la Tabla 16 se resumen las unidades de probabilidad (Pr) para las probabilidades de afectación especificadas y los niveles de radiación térmica que debe generar el incendio para causar los porcentajes de afectación establecidos a partir de la función válida para tal efecto. (Ver Anexo 3 para conocer las ecuaciones de PROBIT para daños causados por radiación térmica).

Tabla 17. Intensidades de Radiación Térmica determinadas por el Modelo PROBIT para probabilidades de afectación del 90, 50 y 1% de población expuesta

% DE AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	Pr	QUEMADURA (KW/m ²)		FATALIDAD (KW/m ²)
		1° Grado	2° Grado	
1	2.67	3.01	3.74	7.05
10	3.72	3.90	4.79	9.58
50	5	5.36	6.47	13.94
99	7.33	9.57	11.19	27.60

Por último, se determinaron las distancias a las cuales se alcanzan los niveles de radiación térmica correspondientes a los porcentajes de afectación de interés de la Tabla 16 usando la gráfica “Radiación térmica versus distancia de afectación de PHAST” para los 5 eventos en mención (chorro y piscina); dicha gráfica se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Radiación Térmica versus Distancia de Afectación de los eventos de incendio de chorro y piscina de la Torre T-201



Para cada una de las curvas de la Figura 27 se determinó la correlación de mejor ajuste para poder determinar con mayor certeza la distancia en la cual los porcentajes de daño establecido se alcanzan; en la Tabla 17 se resumen dichas correlaciones y su forma de uso dentro de esta investigación consistió en introducir los valores de radiación térmica de la Tabla 16 y hallar las distancias correspondientes para cada una de las consecuencias de quemaduras y fatalidad.

Tabla 18. Correlaciones de Radiación Térmica vs Distancia de Afectación para los eventos de Chorro

Chorro Nafta		Piscina CRED	Chorro Diesel	
Succión 1 pulg	Descarga 1 pulg	Descarga 0.5 pulg	Descarga 0.5 pulg	Descarga 1 pulg
$D = 102.39R^{-0.1517}$	$D = 174.93R^{-0.1692}$	$D = 70.084R^{-0.1455}$	$D = 82.042R^{-0.16}$	$D = 151.33R^{-0.1573}$
R2 = 0.9744	R2 = 0.9951	R2 = 0.9948	R2 = 0.9982	R2 = 0.996

En las Tablas 18 a 22 se registran las distancias para las cuales los incendios por chorro de nafta, por piscina de crudo reducido y por chorros de Diesel pueden tener la probabilidad de afectación instaurada sobre la población expuesta de

quemaduras y fatalidad. Lo que significa por ejemplo que para el incendio por chorro de nafta con diámetro de descarga de 1 pulgada en la succión el 50% de la población ubicada en una distancia de 68.7m en la dirección del viento a partir de la bomba P-202C/D morirá.

Tabla 19. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Nafta por descarga de 1 pulg en la succión

% AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	QUEMADURAS (m)		FATALIDAD (m)
	1° GRADO	2° GRADO	
1%	86.6	83.8	76.1
10%	83.3	80.7	72.7
50%	79.4	77.1	68.7
99%	72.7	71.0	61.9

Tabla 20. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Nafta por escape de 1 pulg en la descarga

% AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	QUEMADURAS (m)		FATALIDAD (m)
	1° GRADO	2° GRADO	
1%	145.2	140.0	125.7
10%	138.9	134.2	119.3
50%	131.7	127.6	112.0
99%	119.4	116.3	99.8

Tabla 21. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Piscina de CRED por derrame de 0.5 pulg en la descarga

% AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	QUEMADURAS (m)		FATALIDAD (m)
	1° GRADO	2° GRADO	
1%	59.7	57.9	52.8
10%	57.5	55.8	50.4
50%	54.9	53.4	47.8
99%	50.5	49.3	43.2

Tabla 22. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Diesel por escape de 0.5 pulg en la descarga

% AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	QUEMADURAS (m)		FATALIDAD (m)
	1° GRADO	2° GRADO	
1%	68.8	66.4	60.0
10%	66.0	63.9	57.1
50%	62.7	60.9	53.8
99%	57.2	55.7	48.3

Tabla 23. Corredor de Afectación (m) por Radiación Térmica generada por Incendio de Chorro de Diesel por escape de 1 pulg en la descarga

% AFECTACIÓN DE POBLACIÓN EXPUESTA	QUEMADURAS (m)		FATALIDAD (m)
	1° GRADO	2° GRADO	
1%	127.3	123.0	111.3
10%	122.2	118.3	106.1
50%	116.2	112.8	100.0
99%	106.1	103.5	89.8

4.4.4.2. Daño a equipos (Pérdidas económicas)

Para efectos del ejercicio académico se determinaron las pérdidas económicas por daño total de los equipos involucrados en las distancias de afectación de la radiación térmica únicamente para la unidad U-200, por otro lado, la intensidad usada fue la más crítica (37.5 KW/m^2) pues esta asegura pérdida total de equipos y además se encuentra por encima de la determinada por el método de vulnerabilidad PROBIT para porcentaje de fatalidades del 99% que fue de 27.6 KW/m^2 (Ver Tabla 16).

El resumen de los eventos amenazantes con las distancias de afectación usadas para determinar los equipos afectados se muestran en la Tabla 23, donde el evento que presenta mayor distancia de afectación es el chorro de nafta con escape en la descarga y con un valor de 96.7m.

Tabla 24. Distancias de Afectación usadas para determinar las pérdidas económicas en la U-200

D KW/m ²	Chorro de Nafta		Piscina de CRED	Chorro de Diesel	
	Succión	Descarga	Descarga	Descarga	Descarga
	1 pulg	1 pulg	0.5 pulg	0.5 pulg	1 pulg
37.5	61.6	96.7	41.4	46.3	85.5

A continuación se registran otras consideraciones importantes en la determinación de las pérdidas económicas para la unidad de destilación de crudo U-200 por desencadenamiento de eventos amenazantes provenientes de la torre atmosférica T-201:

✓ Para la determinación de los equipos afectados por incendio de chorro se consideró la distancia obtenida en el modelamiento como aquella desde la fuente del incendio hasta los equipos en dirección del viento, por otro lado se tomó una distancia perpendicular a esta de 7m, asumiendo que la radiación aunque va en la dirección del chorro de fuego tiene una incidencia en los equipos laterales a la fuente, por tanto se tomaron áreas rectangulares de 7 m por la distancia de afectación modelada por PHAST como las zonas de interés.

✓ Para determinar las pérdidas económicas por daño total de equipos solo se consideraron los equipos principales de la unidad es decir, torres, intercambiadores, bombas y tanques pues la intención de esta investigación es dar una estimación aproximada de las pérdidas sin llegar a entrar en detalle, por tanto para mayor profundidad se recomienda hacer un inventario detallado por áreas de afectación enfatizando en la longitud de las tuberías y la cantidad de instrumentos de medición y control para complementar la información que aquí se presenta.

✓ Toda la información de diseño usada para realizar las estimaciones de costos de los equipos de la U-200 fueron tomadas de las hojas de especificaciones del último revamping de la unidad en el año 1994 y cuya última actualización se realizó en el año 2001.

✓ La estimación de costos de las bombas y los intercambiadores se realizó con dos fuentes (Ver Anexo 4), la primera a través de Internet y la segunda usando un programa desarrollado por la refinería de Barrancabermeja. La valoración económica de las bombas centrífugas se calculó de la página web www.matche.com, y los costos de los motores eléctricos se calcularon del programa realizado en la refinería de Barrancabermeja por el Departamento de Paradas de Planta y Administración de Proyectos, con estos dos valores se determinó el total de costo por afectación de bombas teniendo en cuenta si es una pareja de bombas o una sola, por lo general por cada pareja de bombas una es de turbina y la otra un motor eléctrico; para los intercambiadores el costo se estimó usando la misma página de Internet.

✓ El programa para estimar costos de equipos suministrado por los ingenieros de contacto de las Unidades de Topping fue desarrollado por el Departamento de Paradas de Planta y Administración de Proyectos y utiliza los catálogos de precios de los proveedores de equipo estándar y/o las bases de datos de los equipos estándar que se han comprado en la Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL durante los últimos años; se debe resaltar que el precio obtenido por este programa es un buen estimado para el alcance de la monografía, sin embargo este valor tiene un grado inexactitud que si se quiere mejorar se debe consultar directamente con un proveedor de los equipos en cuestión, para obtener una

cotización preliminar, sin implicaciones por parte de la GCB, o consultar los listados de precios que traen algunos catálogos para equipo estándar de diferentes fabricantes.

✓ Para la estimación de costos de las torres atmosféricas, despojadoras y de vacío se asumió que todas presentaban platos de válvula, una presión aproximada de 15 psig y datos de diseño propios de cada equipo. Para ver más detalle acerca de esta estimación ver el Anexo 5.

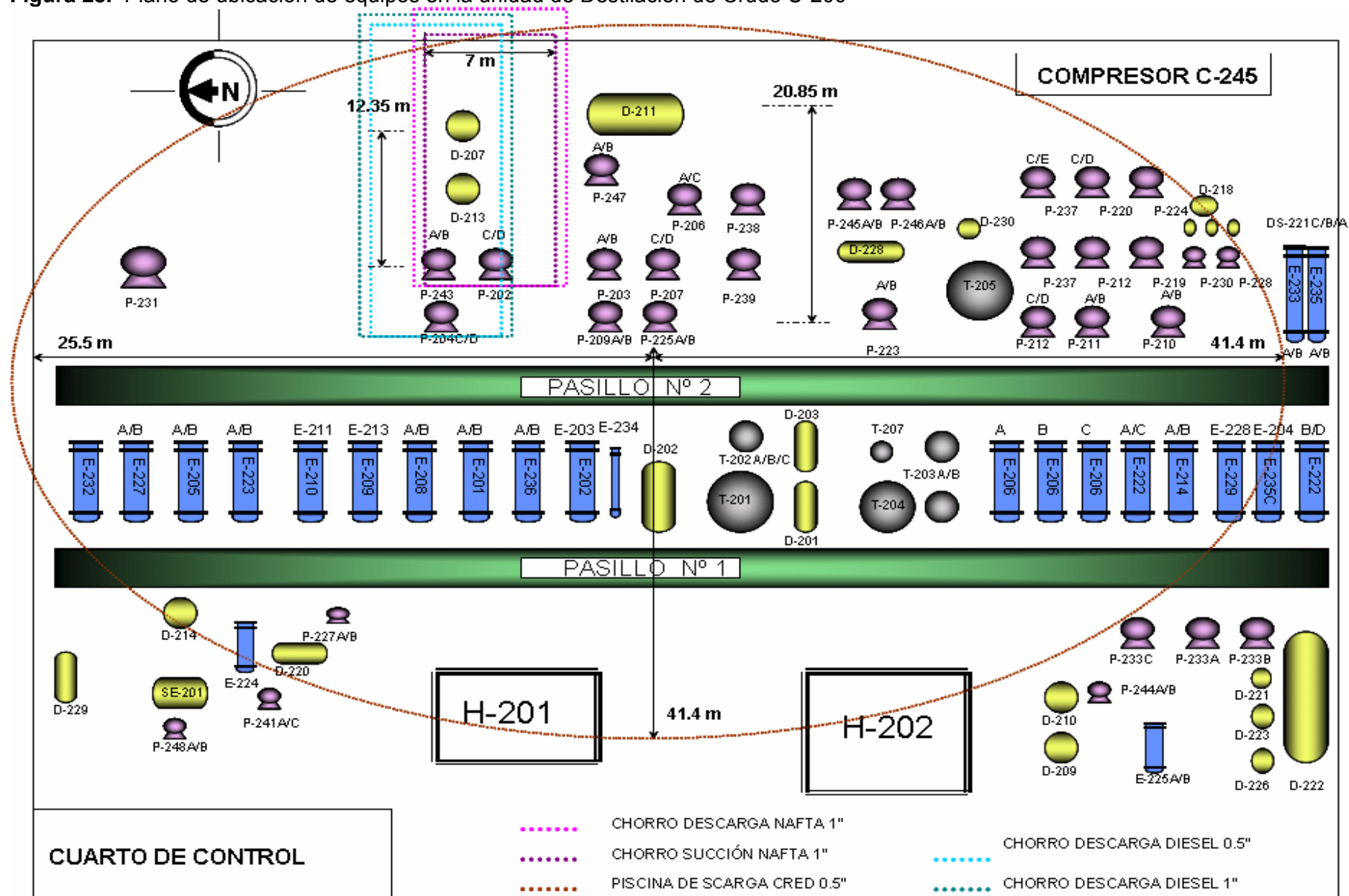
✓ Respecto a los tanques de almacenamiento no se pudo realizar una estimación de costos por falta de información en las hojas de especificaciones respecto a dimensiones y materiales por lo que fue imposible estimar la pérdida de económica para este ejercicio académico, por tanto el valor total estimado por pérdida de equipos no incluye el daño total a tanques.

✓ Distancia de las vías que separan las unidades topping de 12 metros aproximadamente (Información suministrada por los ingenieros de GCB).

✓ Dirección del viento en las horas del día occidente a oriente (Reconocimiento en Planta).

Una vez tomadas en cuenta las consideraciones anteriores se prosiguió a la determinación de las zonas afectadas para seleccionar los equipos que recibirían los impactos de la radiación térmica y posteriormente se calculó su precio por reposición asumiendo pérdida total. La Figura 28 muestra un mapa de ubicación de equipos elaborado usando el PLOT PLAN de la unidad U-200 suministrado por los ingenieros.

Figura 28. Plano de ubicación de equipos en la unidad de Destilación de Crudo U-200



✓ CHORRO DE NAFTA SUCCIÓN 1 PULGADA

Al modelar este evento se encontró que la distancia de afectación para la cual la intensidad de la radiación térmica era suficiente para causar daño a equipos de proceso (37.5 KW/m^2) fue de 61.6 m a partir de la bomba de nafta (P-202C).

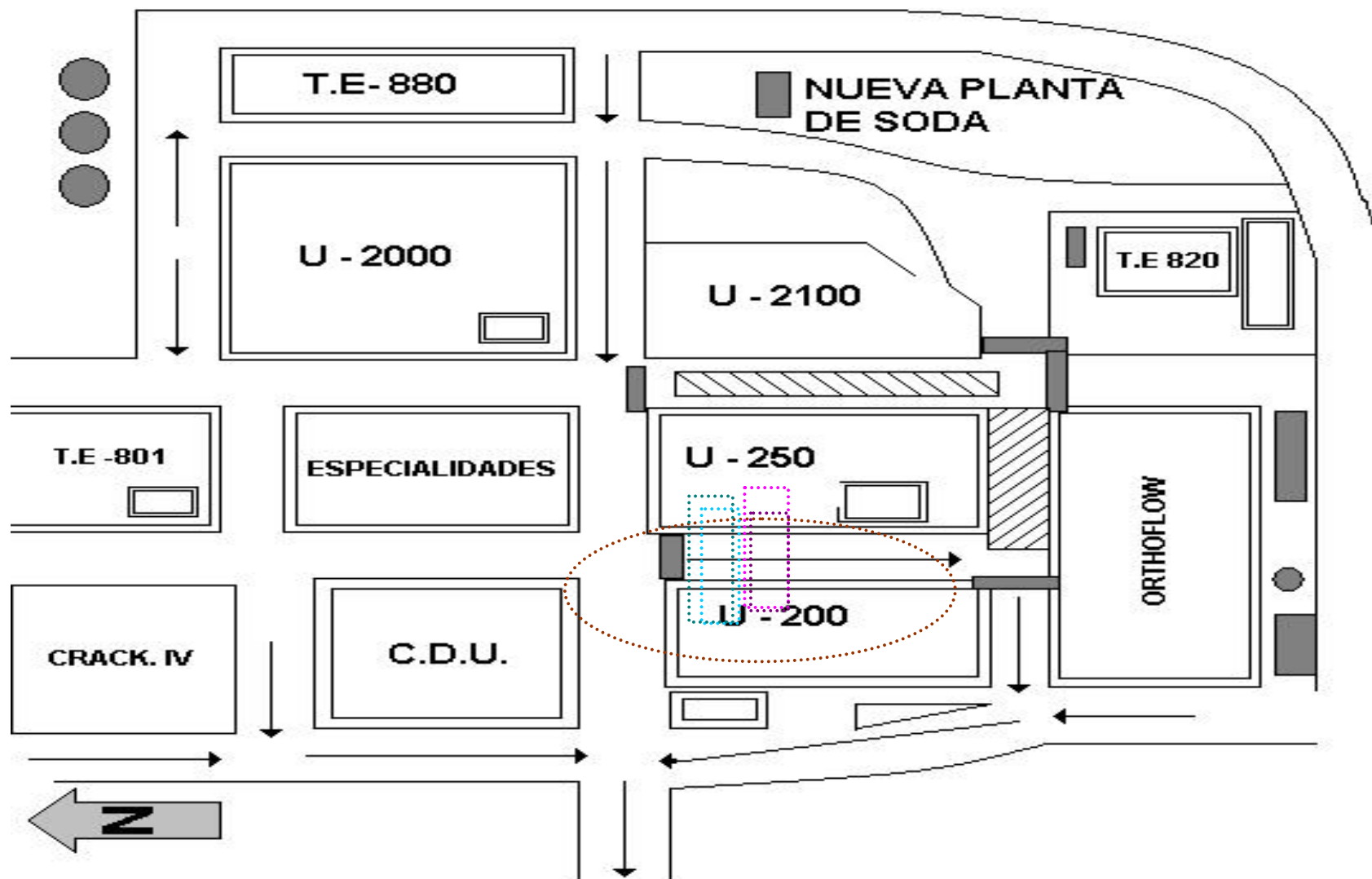
Los equipos afectados por esta radiación se determinaron ubicando la distancia mencionada a partir de la bomba en dirección del viento (occidente a oriente) en el plano de distribución de equipos (Plot Plan) suministrado por los ingenieros de contacto de la Refinería (en la Figura 28 se observa una versión de la distribución de equipos sin distancias) encontrándose que hasta 12.35 m se involucrarían equipos de la unidad U-200 y la distancia restante cubriría 8.5 hasta el último equipo en U-200 que sería el D-211 que por este efecto no se afecta, una zona de aproximadamente 10 m desocupada dentro de la misma unidad, una vía de tránsito vehicular de aproximadamente 12 m y 18.75 m que afectarían directamente los equipos de U-250. Un plano resumido de las unidades de topping se puede ver en la Figura 29. En la Tabla 24 se muestra la lista de equipos afectados en la U-200 y su valor económico.

Tabla 25. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de equipos generada por Chorro de Fuego de Nafta en la Succión

EQUIPO	SERVICIO	PRECIO (Dólares)
P-202C/D	Condensados Cima T-201	27877
P-243A/B	Reflujo Medio T201 (Diesel)	31064
D-213	Tambor Aire Instrumentos	-
D-207	Separador Aire	-
PÉRDIDAS TOTALES POR EQUIPOS		58.941

En la Figura 28 los equipos encerrados por una franja punteado de color morado de ancho 7 m son los equipos afectados por el evento; a modo de esquematizar la afectación en otras plantas, el tamaño de la franja excede la línea límite de la unidad U-200 en dirección del viento, lo que significa que la planta vecina que será impactada es la unidad U-250.

Figura 29. Plano resumido de las Unidades de Topping en la Refinería de Barrancabermeja



Para la zona de afectación circular se debe considerar que el plano no está a escala, por tanto aunque se ve como un óvalo en el análisis realizado en la investigación se consideró como un área circular.

✓ CHORRO DE NAFTA DESCARGA 1 PULGADA

Para este evento se tienen los mismos equipos afectados en U-200 que el evento anterior (Tabla 24) debido a que se produce desde la misma bomba (P-202C/D), sin embargo la distancia de este evento es mucho mayor por el efecto que tiene la gran presión en la descarga respecto a la succión generando una afectación de 96.7 m, por lo tanto aunque las pérdidas económicas en la U-200 son las ya estimadas, las pérdidas para U-250 serían mucho mayores pues esta vez el área que recibiría la afectación por este incendio de chorro tendría una longitud 53.85 m y un ancho de 7 m, teniendo en cuentas las consideraciones que se mencionaron en el evento anterior de áreas desocupadas y vía de tránsito.

En la Figura 28 los equipos encerrados por la franja punteado de color fucsia son los equipos afectados por el evento; a modo de esquematizar la afectación en otras plantas, en este caso el tamaño de la franja excede la línea límite de la unidad U-200 y es mas grande que la franja morada pues su afectación es mayor.

✓ PISCINA DE CRUDO REDUCIDO DESCARGA 0.5 PULGADA

El incendio producido por el derrame de Crudo reducido como piscina genera un área circular de afectación con radio de 41.4m por tanto este evento es el que presenta las mayores pérdidas económicas en la unidad U-200, ya que su origen es en la bomba P-204C/D y al trazar este radio en los equipos de la unidad (Ver figura 28) casi todos serían afectados incluyendo las torres y los hornos que son los equipos de mas importancia y de mayor costo. Detallando en las direcciones de la afectación se tiene que hacia el sur y el oeste el radio estimado se desarrolla en las instalaciones de la U-200, mientras que en dirección norte alcanzaría los predios de la U-150 y en dirección este los predios de la U-250. Respecto al norte se tienen 16 m por fuera de U-200 que se completarían con la vía de separación que tiene 12 m y los restantes 4 m ya entrarían a U-150, sin embargo en esta distancia no se encuentran equipos para ser afectados por la radiación térmica. Por otro lado, en dirección este hacia la U-250 se tienen 20.85 m que se ubican en la zona con equipos de U-200, 10 m desocupados y los 12 m de la vía, por tanto para este evento la afectación no involucra equipos de U-250 pues el evento terminaría faltando 1.45 m antes de llegar a dicha unidad.

En la Figura 28 los equipos encerrados por la circunferencia punteada de color marrón son los equipos afectados por el evento; a modo de esquematizar la afectación en otras plantas, el tamaño de la circunferencia excede la línea límite de la unidad U-200 en las direcciones norte y este y en la Figura 29 se ve la afectación de este evento en todas las topping. En las Tablas 25 hasta la 29 se registran todos los equipos involucrados de la U-200 agrupados por tipo de equipo que entrarían como pérdidas económicas por su daño total y su precio en dólares.

Tabla 26. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de bombas generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido

BOMBA	SERVICIO	Costo BOMBA (US)			Costo MOTOR (US)			TOTAL Dólares
		Cant.	Unidad	TOTAL	Cant.	Unidad	TOTAL	
P-202 C/D	Condensados De Cima T-201	2	12900	25800	1	2077	2077	27877
P-203 A/B	Reflujo de Cima T-201	2	14200	28400	1	2832	2832	31232
P-204 C/D	Fondo Despojadora T-202 B (Acpm)	2	16100	32200	1	6091	6091	38291
P-206 A	Fondo Despojadora T-202 C	1	11400	11400	1	1432	1432	12832
P-206 C	Fondo Despojadora T-202 C	1	11400	11400	1	2077	2077	13477
P-207 C/D	Reflujo Inferior T-201	2	25400	50800	1	2351	2351	53151
P-209 A	Fondos T-253 A H-202 (Carga A Vri)	1	15500	15500	1	159320	159320	174820
P-209 B	Carga A Viscorreductora	1	5000	5000	-	-	-	5000
P-210 A/B	Reflujo Cima T-204	2	12600	25200	1	2832	2832	28032
P-211 A/B	Reflujo Medio Y Producto T-204	2	14500	29000	1	9711	9711	38711
P-212 A/B	Reflujo Inferior T-205	2	11800	23600	1	1835	1835	25435
P-212 C/D	Reflujo Medio T-205	2	12600	25200	1	5264	5264	30464
P-219 A/B	Aceite De Ciclo Liviano	2	11800	23600	2	2832	5664	29264
P-220 C/D	Reflujo Cima T-205	2	24200	48400	1	2351	2351	50751
P-223 A	Fondos De Vacío T-205	1	14500	14500	1	24802	24802	39302
P-223 B	Fondos De Vacío T-205	1	2900	2900	-	-	-	2900
P-224	Quench Cuando Opera como VRI	1	12300	12300	1	1523	1523	13823
P-225 ^a	Crudo Reducido T-201	1	14500	14500	1	24802	24802	39302
P-225 B	Crudo Reducido T-201	1	4000	4000	-	-	-	4000
P-227 A/B	Agua Calderas De D220 A E223 A/B	2	14500	29000	2	1835	3670	32670
P-231 A/B	Carga Crudo A U-200	2	15500	31000	1	34590	34590	65590
P-232 A/B	Alimento De Agua Al Desalador	2	2400	4800	1	2077	2077	6877
P-237 C/D	Producto De T-207	2	12300	24600	1	4294	4294	28894
P-237 E	Reciclo T-204	1	12300	12300	1	1523	1523	13823
P-238 / 239	Fondo T-202 A	2	12900	25800	1	2077	2077	27877
P-243 A/B	Reflujo Medio T201	2	12900	25800	1	5264	5264	31064

EQUIPO	SERVICIO	Costo BOMBA (US)			Costo MOTOR (US)			TOTAL Dólares
		Cant.	Unidad	TOTAL	Cant.	Unidad	TOTAL	
P-246 A/B	Agua De Proceso T205 A D228	2	11200	22400	2	1189	2378	24778
P-247 A/B	Condensado De D221	2	11400	22800	2	3143	6287	29087
PÉRDIDAS TOTALES POR BOMBAS		46	353.000	602.200	29	308.124	317.122	919.322

Tabla 27. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de Intercambiadores de Calor generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido

INTERCAMBIADOR	FLUIDO CORAZA	FLUIDO TUBOS	CANTIDAD	COSTOS (Dólares)
E-201 A / B	CRUDO	NAFTA	2	103200
E-202	DIESEL	CRUDO	1	66900
E-203	GASÓLEO ATMOSFÉRICO	CRUDO	1	84200
E-204	DIESEL	CRUDO	1	57200
E-205 A / B	CRUDO	DIESEL	2	77600
E-206 A	CRUDO	FONDOS DE VACIO	1	62400
E-206 B	CRUDO	FONDOS DE VACIO	1	62400
E-206 C	CRUDO	FONDOS DE VACIO	1	62400
E-207 A / B	VAPOR CIMA T-201	AGUA	2	283700
E-208 A / B	NAFTA	AGUA	2	162100
E-209	JET A	AGUA	1	73200
E-210	DIESEL	AGUA	1	92700
E-211	DIESEL	AGUA	1	73200
E-212 A / B	VAPOR CIMA T-204	AGUA	2	178500
E-213	GASÓLEOS	AGUA	1	99800
E-214 A / B	GASÓLEO LIVIANA VACÍO	AGUA	2	128300
E-222 A / C	CRUDO	GASÓLEO ATMOSFÉRICO	2	100900
E-223 A / B	FONDOS T-253	AGUA CALIENTE	2	139000
E-224	AGUA CALDERAS	AGUA ENFRIAMIENTO	1	109600
E-227 A / B	CRUDO	NAFTA	2	106800

INTERCAMBIADOR	FLUIDO CORAZA	FLUIDO TUBOS	CANTIDAD	COSTOS (Dólares)
E-228	FONDOS U-250	AGUA	1	131200
E-229	JET A	AGUA	1	39400
E-230	CRUDO	VAPOR CIMA T-204	1	215300
E-232	CRUDO	JET A	1	51600
E-234	GOA	AGUA CALDERAS	1	15600
E-235 C	CRUDO	FONDOS DE VACIO	1	65000
E-236 A / B	CRUDO	DIESEL	2	106700
E-237	VAPORES CIMA T-205	AGUA	1	250000
E-238	VAPORES CIMA T-205	AGUA	1	93200
E-239	VAPORES CIMA T-205	AGUA	1	47200
E-245	ACEITE	AGUA	1	4900
PÉRDIDAS TOTALES POR INTERCAMBIADORES			41	3'144.200

Tabla 28. Pérdidas económicas en la U-200 por Reposición de tanques generada Incendio de Piscina de Crudo Reducido

TANQUE	SERVICIO	CANTIDAD
D-201	Over Head Accumulator T-201	1
D-202	Tambor Carga a Viscosreductora	1
D-203	Over Head Accumulator T-204.	1
D-205	Tambor de Sello D-201 y D-203	1
D-207	Tambor de Aire de Instrumentos	1
D-211	Tambor de Blow Down	1
D-213	Separador de Aire	1
D-214	Tambor de Gas Combustible	1
DS-218	Dow Corning	1
D-220	Tambor de Agua Temperada	1
DS-221C/BA	Tambor Condensados Proceso.	3
D-228	Separador condensado inyectores	1
D-230	Sello (Venteo de gas)	1
TOTAL		15

Tabla 29. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de Torres generada por Incendio de Piscina de Crudo Reducido

TORRES	SERVICIO	COSTOS (Dólares)
T-201	Torre Atmosférica principal	350000
T-202A	Torre Despojadora de T-201	40000
T-202B	Torre Despojadora de T-201	40000
T-202C	Torre Despojadora de T-201	40000
T-204	Torre Atmosférica secundaria	170000
T-207	Torre Despojadora de T-204	20000
T-203A	Torre Soaker T-204	70000
T-203B	Torre Soaker T-204	70000
T-205	Torre de Vacío	220000
TOTAL POR PÉRDIDAS DE TORRES		1'020.000

Tabla 30. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de hornos generado por Incendio de Piscina de Crudo Reducido

HORNOS	SERVICIO	COSTOS (Dólares)
H-201	Torre Atmosférica principal	1'894.700
H-202	Torre Despojadora de T-201	2'647.700
TOTAL POR PÉRDIDAS DE TORRES		4'542.400

✓ CHORRO DE DIESEL DESCARGA 0.5 PULGADA

Al modelar este evento se encontró que la distancia de afectación para la cual la intensidad de la radiación térmica sería suficiente para causar daño a equipos de proceso (37.5 KW/m^2) es de 46.3 m a partir de la bomba de Diesel (P-204C).

Los equipos afectados por esta radiación se determinaron ubicando la distancia mencionada a partir de la bomba en dirección del viento (occidente a oriente) en el plano de distribución de equipos (Plot Plan) suministrado por los ingenieros de contacto de la Refinería (en la Figura 28 se observa una versión de la distribución de equipos sin distancias) encontrándose que hasta 19.1 m se involucrarían equipos de la unidad U-200 y la distancia restante cubriría 1.75m hasta el último equipo en U-200 que sería el D-211 que por este evento no se afecta, una zona de aproximadamente 10 m desocupada dentro de la misma unidad, una vía de tránsito vehicular de aproximadamente 12 m y 3.45 m que afectarían directamente los equipos de U-250. En el plano resumido de las unidades de topping (Figura 29) se puede ver en la afectación del evento en U-200, considerando que el área de afectación es una franja de ancho 7m. En la tabla 30 se muestra la lista de equipos afectados en la U-200 y su valor económico.

Tabla 31. Pérdidas económicas en U-200 por Reposición de equipos generada por Chorro de Fuego de Diesel en la descarga 0.5”

EQUIPO	SERVICIO	PRECIO (Dólares)
P-204C/D	Diesel T-202 B (Acpm)	38291
P-202C/D	Condensados De Cima T-201	27877
P-243A/B	Reflujo Medio T201 (Diesel)	31064
D-213	Tambor De Aire De Instrumentos	-
D-207	Separador De Aire	-
PÉRDIDAS TOTALES POR EQUIPOS		97.232

En la Figura 28 los equipos encerrados por una franja punteado de color azul claro de ancho 7 m son los equipos afectados por el evento; debido a que el evento excede los límites de U-200 el tamaño de la franja excede la línea límite de la unidad U-200 en dirección del viento hasta la unidad U-250.

✓ CHORRO DE DIESEL DESCARGA 1 PULGADA

Este evento tiene una distancia de afectación de 85.5m y por desencadenarse por fuga de Diesel se origina desde la misma bomba P-204C por lo tanto sus efectos en dirección del viento tiene el mismo impacto por pérdidas de equipos en la U-200 que el evento anterior (Ver Tabla 30), sin embargo las pérdidas generadas sobre la U-250 son mayores pues la franja cubre una distancia en esta planta de 42.65 m después de pasar por la vía de separación (12m), la zona desocupada de U-200 (10m), aquella no afectada por el evento (1.75m) hasta el D-211 desde el último equipo afectado en U-200 y la distancia de afectación en los equipos en U-200 de 19.1m.

4.4.4.3. Personal en las Unidades de Topping. Para poder estimar la cantidad de fatalidades realmente en las plantas de destilación fue necesario hacer un inventario de las personas que permanecen dentro dichas instalaciones. Se encontró que existen algunos unidades que se reúnen de a dos por cuarto de control como se ve en la Tabla 31 en la agrupación por colores. Específicamente hablando de la U-200 esta comparte su cuarto de control con la U-150. En general, el personal presente se distribuye en un técnico de pantalla, 2 operadores de patio por planta, un persona que realiza el aseo para cada cuarto de control y una cantidad de personas contemplada que puede estar realizando cualquier labor en el patio pero que no es de normal permanencia dentro de las instalaciones, en este punto se contemplaron 2 trabajos en el patio cada uno con 2 personas de acuerdo a los criterios de los ingenieros de HSEQ de la refinería de Barrancabermeja.

Tabla 32. Personal en las Unidades de Topping

DESCRIPCIÓN	U-200	U-150	U-2100 y Soda	U-250	U-2000 y Especialidades
Operador Pantalla	1	1	1	1	1
Operador de Patio	2	2	2	2	2
Señora del Aseo	1	-	1	1	1
Total Cuarto Control*	7		4	4	4
Personas en trabajos de patio**	4	4	4	4	4
Total Personal	8	7	8	8	8
TOTAL PERSONAS EN UNIDADES TOPPING	39				

* Total de personas en los cuartos de control.

**Estimación de personal realizando obras en patio ajeno a la operación normal de la planta.

4.4.5. Calificación y Selección de las Categorías de Consecuencias de Interés

Las categorías de consecuencias de interés en este estudio se centraron en la afectación a personas, pérdidas económicas por daño en equipos y pérdidas de imagen por vertimientos líquidos y gaseosos al medio ambiente. Esta selección se realizó teniendo en cuenta los principales impactos propiciados por los eventos amenazantes críticos de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia dentro de la unidad U-200.

La selección de los eventos amenazantes más críticos se realizó teniendo en cuenta la magnitud de sus posibles consecuencias y la frecuencia de ocurrencia que se muestra en la Tabla 11, escogiendo para este análisis de consecuencias aquellos eventos que presentaron la máxima calificación de frecuencia que en este caso en una escala de 1 a 5 fue 5; quienes lo presentaron fueron la liberación de hidrocarburos livianos a la atmósfera, incendio por derrame de hidrocarburos líquidos (Piscina de fuego, Llamarada de fuego), incendio por escape de hidrocarburos en fase vapor (Piscina de fuego, Chorro de fuego, Llamarada de fuego) y derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena.

En la Tabla 32 se muestra para cada el desarrollo secuencial a partir del evento iniciante hasta las posibles consecuencias y se realiza la selección de las consecuencias de interés de esta investigación.

Tabla 33. Consecuencias Seleccionadas en el Análisis de la Unidad de Destilación de Crudo U-200

EVENTO INICIANTE	EVENTO AMENAZANTE	CONSECUENCIAS		
		CATEGORÍAS	JUSTIFICACIÓN DE SELECCIÓN	
Liberación de Hidrocarburos Livianos (fase gaseosa)	Liberación de Hidrocarburos Livianos a la Atmósfera	-Pérdidas de imagen por emisión de hidrocarburos a la atmósfera	Presencia constante y visible de llama en las teas y de humo negro.	✓
		-Contaminación Atmosférica por emisión y quema de hidrocarburos en las teas	Hay constante vertimiento pero no se tiene suficiente información que sustente violación a la ley.	✓
		-Pérdidas económicas por quema de hidrocarburos livianos que pueden ser procesados	No se tiene información de la cantidad de hidrocarburos quemados en la tea.	
Derrame de Hidrocarburos (líquido)	Incendio (Piscina de fuego, Llamada de fuego)	-Afectación a personas (quemaduras, fatalidades)	Los seres humanos son la principal pérdida que cualquier accidente puede producir.	✓
		-Pérdidas económicas por daño en equipos	La gran cantidad de equipos y su alto costo de reposición.	✓
		-Pérdidas operacionales por paradas no programadas y disminución de producción de combustibles	No se encuentran dentro del alcance de este estudio, pero representan grandes pérdidas económicas.	
Escape Hidrocarburos (vapor)	Incendio (Chorro de fuego, Llamada de fuego)	-Afectación a personas (quemaduras, fatalidades)	Los seres humanos son la principal pérdida que cualquier accidente puede producir.	✓
		-Pérdidas económicas por daño en equipos	La gran cantidad de equipos y su alto costo de reposición.	✓
		-Pérdidas operacionales por paradas no programadas y disminución de producción de combustibles	No se encuentran dentro del alcance de este estudio, pero representan grandes pérdidas económicas.	
Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	Pérdidas de imagen por vertimientos líquidos a una fuente hídrica primordial como lo es el río Magdalena.	Aunque los vertimientos no tienen una alta frecuencia el impacto sobre la comunidad es considerable.	✓
		-Contaminación Atmosférica por vertimiento de hidrocarburos al río	Hay evidencias de vertimientos al río menores a 10Barriles.	✓
		-Pérdidas económicas por desperdicio de hidrocarburos que pueden ser procesados y/o vendidos	La cantidad de hidrocarburo desperdiciado en las descargas no es considerable.	

4.5. VALORACIÓN FINAL DEL RIESGO

En esta monografía se realizó la valoración del riesgo usando matrices, ya que estas permiten percibir el análisis de una forma más gráfica y de fácil interpretación.

El análisis matricial del riesgo manejó los términos de frecuencia y de consecuencias, donde el valor de la frecuencia se determinó en la sección de evaluación de la amenaza y el valor de las consecuencias resulta de la correlación lineal del puntaje de consecuencias evaluado para todas las categorías de interés y al igual que la frecuencia tiene un intervalo de calificación que en este caso va de 0 a 5.

Obtenidos los valores matriciales de amenaza y consecuencias, finalmente se multiplicaron y se obtuvo un nuevo número denominado “Número Matricial del Riesgo”, con el cual se determinó la severidad del riesgo.

En este estudio se usaron dos tipos de valoración matricial del riesgo, el primero fue a través de la Matriz RAM y el segundo usando todas las estimaciones de consecuencias a personas y a equipos determinadas en este estudio, la frecuencia de ocurrencia de acuerdo a la vida de la instalación para así dar una valoración más real de los posibles riesgos.

4.5.1. Matriz RAM

Esta valoración consistió en determinar el riesgo de los eventos amenazantes que se han desarrollado en las unidades de destilación de crudo de la refinería de Barrancabermeja de acuerdo a las evidencias objetivas registradas en el portal de incidentes respecto a la frecuencia de ocurrencia y a la magnitud de las consecuencias teniendo en cuenta las categorías seleccionadas en la Tabla 32.

Para la valoración del riesgo con la matriz RAM se escogieron los eventos amenazantes de mayor ocurrencia como se mencionó anteriormente con el fin de analizar aquellos casos que se consideraron más extremos.

De acuerdo a la metodología RAM para la calificación de las consecuencias se tienen 4 categorías que son daño a personas, pérdidas económicas, daños al medio ambiente y pérdida de imagen de la empresa, las cuales tienen niveles de calificación dependiendo de la afectación que cada evento produce. Los niveles de calificación de las categorías de consecuencias de la RAM se encuentran en la Figura 30 y un detalle de la gravedad de las consecuencias en el Ambiente y en Imagen se detallan en el Anexo 6.

Figura 30. Matriz RAM básica de Valoración del Riesgo

CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD					
Personas	Economica *	Ambiental	Imagen de la Empresa		A	B	C	D	E
					No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en la refinería
Una o mas Fatalidades	Catastrofica > 10 MUS\$	Masivo	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad Permanente	Grave 1 a 10 MUS\$	Mayor	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad Temporal > 1 día	Severo 100 KUS\$ a 1 MUS\$	Localizado	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesion Menor (sin auxilios)	Importante 10 a 100 KUS\$	Menor	Local	2	N	N	L	L	M
Lesion Leve (1ros auxilios)	Marginal < 10 KUS\$	Leve	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna Lesion	Ninguna	Ningun Efecto	Ningun Impacto	0	N	N	N	N	N

En la Tabla 33 se muestra la calificación de las consecuencias seleccionadas de los eventos amenazantes y un identificador (ID) con el cual se ubicaron dentro de la matriz una vez obtenida su calificación final del riesgo.

Tabla 34. Calificación de las consecuencias para la Valoración con la Matriz RAM

EVENTO AMENAZANTE	ID	CALIFICACIÓN CONSECUENCIAS			
		Personas	Económicas	Ambiente	Imagen
Liberación de Hidrocarburos Livianos a la Atmósfera	LHATM	-	-	2 Menor	2 Local
Incendio Líquidos (Piscina de fuego, Llamada de fuego)	INCENL	1 Lesión Leve	1 Marginal	-	-
Incendio Vapores (Piscina de fuego, Chorro de fuego, Llamada de fuego)	INCENV	1 Lesión Leve	1 Marginal	-	-
Derrame de Hidrocarburos al Río Magdalena	DERRIO	-	-	3 Localizados	3 Regional

Y en la Tabla 34 se muestra la valoración de la frecuencia de ocurrencia para cada uno de los eventos amenazantes.

Tabla 35. Probabilidad de las Consecuencias para la Valoración con la Matriz RAM

ID	PROBABILIDAD CONSECUENCIAS			
	Personas	Económicas	Ambiente	Imagen
LHATM	-	-	(E) Sucede Varias veces por año en Refinería	
INCENL	(C) Ha ocurrido en ECOPETROL		-	-
INCENV	(C) Ha ocurrido en ECOPETROL		-	-
DERRIO	-	-	(D) Sucede varias veces por año ECOPETROL	

Debido a que cada categoría tiene una calificación de riesgo para cada evento amenazante, en la Tabla 35 se consignan las calificaciones parciales del riesgo y la calificación total teniendo en cuenta que esta valoración se dio escogiendo el mayor riesgo dentro de las 4 categorías.

Tabla 36. Valoraciones Parciales de Riesgo en la Matriz RAM








ID	RIESGO PARCIAL				RIESGO TOTAL
	Personas	Económicas	Ambiente	Imagen	
LHATM			M	M	M
INCENL	N	N			N
INCENV	N	N			N
DERRIO			M	M	M

Finalmente en la Figura 31 se muestra gráficamente el riesgo de cada uno de los eventos amenazantes que se han desarrollado en los 2 últimos años en las unidades de topping de Barrancabermeja, encontrándose que los efectos sobre el ambiente y la pérdida de imagen por vertimiento de hidrocarburos líquidos y gaseosos son los que presentan la mayor calificación y que por el contrario a lo que se podría pensar los eventos de incendio que se han dado no presentan en la matriz RAM un riesgo considerable sino uno muy bajo que puede ser controlado fácilmente.

Dentro de la Figura 31 se agruparon los eventos de incendio de líquidos y vapores bajo el identificador **INCENL/V** por lo que cuando se encuentre esta sigla en la matriz se refiere a que la calificación del riesgo de los incendios es la misma dentro de la casilla respectiva.

En el Anexo 7 se consigna la interpretación de la valoración de riesgos con la RAM.

Figura 31. Valoración Final del Riesgo en la U-200 a través de la Matriz RAM

CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD					
				A	B	C	D	E	
 Personas	\$\$\$ Económica ⁴	 Ambiental	 Imagen de la Empresa	No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en Ecopetrol	Sucede varias veces por año en la refinería	
Una o mas Fatalidades	Catastrofica > 10 MUS\$	Masivo	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad Permanente	Grave 1 a 10 MUS\$	Mayor	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad Temporal > 1 dia	Severo 100 KUS\$ a 1 MUS\$	Localizado	Regional	3	N	L	M	 DERRIO IVI	H
Lesion Menor (sin)	Importante 10 a 100 KUS\$	Menor	Local	2	N	N	L	L	 LHATM IVI  LHATM
Lesion Leve (1ros auxilios)	Marginal < 10 KUS\$	Leve	Interna	1	N	N	 INCENL/V IVI INCENL/V	\$\$\$ L	L
Ninguna Lesion	Ninguna	Ningun Efecto	Ningun Impacto	0	N	N	N	N	N

4.5.2. Matriz Investigación

Esta valoración consistió en determinar el riesgo de los escenarios más críticos que se detectaron durante esta investigación los cuales estuvieron en el circuito de nafta, en el circuito Diesel y en el circuito de Crudo Reducido. En los circuitos mencionados se modelaron los corredores de protección alrededor de las bombas que impulsan estos fluidos como se vio en la sección 4.4.3, pues estos equipos son los principales responsables de escapes y derrames dentro de las topping y los hidrocarburos en cuestión los que más sufrieron pérdida de contención durante el periodo analizado lo que indica que en general son peligros con un alto potencial de desarrollo a accidentes.

En resumen el riesgo se determinó para los eventos de incendio de Chorro de Nafta en la línea de succión de la bomba para un orificio de rotura de 1 pulgada, Chorro de Nafta en la línea de descarga de la bomba para un orificio de rotura de 1 pulgada, Piscina de Crudo Reducido generada por derrame en la línea de Descarga de la bomba con orificio de rotura de 0.5 pulgadas, Chorro de Diesel generado en la línea de descarga de la bomba con orificio de rotura de 0.5 pulgadas y finalmente del Chorro de Diesel generado en la línea de descarga de la bomba de con orificio de 1 pulgada.

Las categorías de consecuencias que se evaluaron fueron las mismas que en la metodología RAM con los mismos niveles de calificación, sin embargo respecto a la probabilidad para esta matriz se consideraron parámetros de frecuencia para una instalación tomando en cuenta la vida útil estimada de la planta de 30 años (Ver Tabla 10).

Como se observa en la Tabla 32, para los incendios las categorías de consecuencias de interés son las relacionadas con afectación a personas y pérdidas económicas, por tanto la valoración de riesgo en esta nueva matriz se hizo respetando dichas categorías; por otro lado se usó la cuantificación de pérdidas económicas que se realizó en la sección 4.4.4.2., para los eventos mencionados que se modelaron en PHAST con las mayores distancias de afectación los cuales se dieron al definir los escenarios con mayor generación de radiación térmica (37 KW/m^2), esto con el fin de dar una estimación de costos por reposición de equipos que tendría que realizar la refinería si los eventos de mayor afectación se dieran para los tres fluidos críticos.

Respecto a la afectación a personas se usó la probabilidad de fatalidad del 99% sobre la población expuesta para estos escenarios ya que las distancias de afectación usadas para determinar las pérdidas económicas producen radiación térmica de 37 KW/m^2 valor superior a la radiación necesaria para obtener esta probabilidad según la tabla 15 donde se registra un valor de radiación térmica de 27.6 KW/m^2 necesario para asegurar este porcentaje de fatalidades.

Se aclara que las pérdidas económicas y la cantidad de fatalidades mostradas en la Tabla 36 son únicamente sobre el área de la unidad de destilación U-200, teniendo en cuenta que el alcance de esta monografía solo recae sobre esta unidad, sin embargo debido a que las afectaciones se manifiestan sobre otras plantas vecinas

se recomienda que a nivel de ECOPETROL S.A se realice la estimación completa de dichas pérdidas tanto en equipos como en personas, para sacar el total de consecuencias sobre toda la refinería de Barrancabermeja.

Por otro lado, debido a la falta de información técnica para calcular los costos de reposición por tanques de almacenamiento se debe considerar que las pérdidas económicas de la Tabla 36 son menores de las totales en equipos pues no incluyen el costo por la destrucción de estos equipos.

Tabla 37. Resumen de las Fatalidades y las Pérdidas Económicas por los Eventos Amenazantes Críticos de la U-200

INCENDIO	ECONÓMICAS (Dólares)	FATALIDADES (Máx Personas)
Chorro de Nafta Succión 1 pulgada	58.941	1-3
Chorro de Nafta Descarga 1 pulgada	58.941	1-3
Piscina de Crudo Reducido Descarga 0.5 pulgada	9'625.922	3-5
Chorro de Diesel Descarga 0.5 pulgada	97.232	1-3
Chorro de Diesel Descarga 1 pulgada	97.232	1-3

La determinación de las fatalidades mostradas en la Tabla 36 se realizó teniendo en cuenta las áreas mostradas en la Figura 28 y la cantidad de personas posibles a permanecer en dichas zonas; predominó el hecho que ninguna consecuencia afectada el cuarto de control debido a que se encuentra en dirección contraria a la dirección del viento y que por tanto la cantidad de personas de normal permanencia en este sitio no se verán afectadas salvo los operadores de patio que podrían estar en la zona de afectación por labores de rutina. Por otro lado, como se registró en la Tabla 31 además del personal en el cuarto de control se estima presencia de personas en el patio de la planta haciendo labores de mantenimiento o limpieza hasta un total aproximado de 4 individuos, sin embargo por las áreas de afectación para los chorros de fuego la posibilidad que el total de estas personas estén en dichas áreas es pequeño, por lo que en fatalidades solo se colocó como máximo 3 personas considerando la eventual posibilidad. Por su parte debido al gran alcance que tendría el incendio de piscina, la cantidad de fatalidades es mucho mayor, pues casi toda el área del patio de la unidad U-200 se vería involucrada y la probabilidad que el personal de mantenimiento y limpieza sea afectada es grande, de ahí el valor registrado.

Con lo mencionado anteriormente se calificaron las consecuencias potenciales de los incendios y su valor se muestra en la Tabla 37.

Tabla 38. Calificación de las consecuencias para la Valoración con la Matriz Investigación

EVENTO AMENAZANTE	ID	CALIFICACIÓN CONSECUENCIAS	
		Personas	Económicas
Chorro de Nafta Succión 1 pulgada	NS1"	5 Una o más fatalidades	2 Importante (10-100 KUS\$)
Chorro de Nafta Descarga 1 pulgada	ND1"	5 Una o más fatalidades	2 Importante (10-100 KUS\$)
Piscina de Crudo Reducido Descarga 0.5 pulgada	CRED	5 Una o más fatalidades	5* Grave (1-10 MUS\$)
Chorro de Diesel Descarga 0.5 pulgada	D0.5"	5 Una o más fatalidades	3** Severo (100 KUS\$-1MUS\$)
Chorro de Diesel Descarga 1 pulgada	DD1"	5 Una o más fatalidades	3** Severo (100 KUS\$-1MUS\$)

*Se clasificó como mayor a 1 Millón de Dólares por la cantidad de tanques afectados que no se estimaron en los costos.

** Se clasificó como mayor a 100 KUS\$ por la cantidad de tanques afectados que no se estimaron en los costos.

La probabilidad de las consecuencias se determinó usando los parámetros de calificación de la Tabla 10 encontrándose los resultados de la Tabla 38, siendo todos calificados con el mínimo ya que estos eventos son los mas catastróficos que podrían suceder pero que hasta este momento aún no se han dado en ninguna de las plantas de topping.

Tabla 39. Probabilidad de las Consecuencias para la Valoración con la Matriz Investigación

ID	PROBABILIDAD	
	Personas	Económicas
NS1"	1	2
ND1"	1	2
CRED	1	1
D0.5"	1	2
DD1"	1	2





Debido a que cada categoría tiene una calificación de riesgo para cada evento amenazante, en la Tabla 39 se consignan las calificaciones parciales del riesgo y la calificación total teniendo en cuenta que esta valoración se dio escogiendo el mayor riesgo dentro de las 2 categorías.

Tabla 40. Valoraciones Parciales de Riesgo en la Matriz Investigación

ID	RIESGO PARCIAL		RIESGO TOTAL
	Personas	Económicas	
NS1"	M	N	M
ND1"	M	N	M
CRED	M	M	M
D0.5"	M	L	M
DD1"	M	L	M

✓ Finalmente en la Figura 32 se muestra gráficamente el riesgo total de cada uno de los eventos amenazantes que se podrían desarrollar en las unidades de topping de Barrancabermeja, encontrándose que los las pérdidas económicas no representan un riesgo mayor comparada con lo que significa la existencia de una fatalidad por motivo de una actividad industrial. Sin embargo a pesar de que es posible la existencia de fatalidades la probabilidad de que dichos eventos ocurran y tengan esa magnitud de consecuencias es muy improbable de ahí que la valoración del riesgo se mitigue sustancialmente, aunque no deja de tener una calificación media por lo que se debe implementar mecanismos en todos los niveles de la organización que puedan mitigar estas consecuencias.

Figura 32. Valoración Final del Riesgo en la U-200 a través de la Matriz Investigación

CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD					
				1	2	3	4	5	
 Personas	\$\$\$ Económica *	 Ambiental	 Imagen de la Empresa	1 caso en Vida útil de la planta (30 años)	1 caso cada 15 años	1 caso cada 8 años	1 caso cada 3 años	1 caso cada año	
Una o mas Fatalidades	Catastrofica > 10 MUS\$	Masivo	Internacional	5	NS1" DD0.5" CRED	ND1" DD1" 	H	H	VH
Incapacidad Permanente	Grave 1 a 10 MUS\$	Mavor	Nacional	4	L \$\$\$	M	M	H	H
Incapacidad Temporal > 1 dia	Severo 100 KUS\$ a 1 MUS\$	Localizado	Regional	3	N	DD0.5" DD1" \$\$\$	M	M	H
Lesion Menor (sin)	Importante 10 a 100 KUS\$	Menor	Local	2	N	NS1" ND1" \$\$\$	L	L	M
Lesion Leve (1ros auxilios)	Marginal < 10 KUS\$	Leve	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna Lesion	Ninguna	Ningun Efecto	Ningun Impacto	0	N	N	N	N	N

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Registros en el Portal de Incidentes

- ✓ La calidad y cantidad de información confiable debidamente registrada y disponible a cerca de los incidentes relacionados con causas de eventos, eventos iniciantes y de eventos amenazantes es fundamental para poder sacar conclusiones a cerca de cuáles son los orígenes de las fallas que a futuro podrían desencadenar en accidentes de grandes magnitudes para la refinería.
- ✓ La falta de reportes con descripciones adecuadas registradas en el portal de incidentes de la GCB – Gerencia Complejo Industrial Barrancabermeja, generó incertidumbre con respecto a las verdaderas causas de falla y a la selección de las condiciones, los tipos y estado de fluidos mas propensos a desencadenar accidentes en las plantas de Topping U- 200
- ✓ No se lograron evidenciar las causas raíz, ni las primarias de las fallas que pueden producir eventos amenazantes debido a la inapropiada descripción técnica de los incidentes en el portal de la refinería. Esta imposibilita de entrar tomar medidas claras correctivas y de mejora.
- ✓ Se encontraron reportes por duplicado en el portal de incidentes y mal clasificados de acuerdo con su categoría, lo que conlleva a análisis estadísticos inadecuados si no se entra a revisar en detalle el contenido de dichos reportes y por consiguiente, demandando mayor tiempo y recursos en análisis.
- ✓ La forma de reportar los incendios (evento amenazante) en el portal de incidentes no es diferencial (diferenciar entre Chorro de Fuego y Llamada por ejemplo) y no permite extraer con certeza las causas que los provocaron y en una buena cantidad tampoco saber que fluidos estuvieron involucrados, por tanto se debe asegurar un procedimiento adecuado para realizar dichos reportes, para poder contar con lecciones aprendidas, que eviten futuros incidentes de este tipo, con gran potencial de destrucción.

Causas Principales

- ✓ Se encontró que las principales causas que desencadenan eventos peligrosos en las unidades de destilación de crudo fueron operaciones inadecuadas e irregularidades en bombas, instrumentos de medición y control como válvulas, disparo del compresor. Se evidencia también problemas de recibo de gases por el compresor y la constante existencia de fluidos a temperaturas superiores de las diseñadas en líneas y tanques de recibo de producto.
- ✓ Los árboles de falla como método cualitativo permiten tener una idea general con mejor facilidad de apreciación para los niveles administrativos, de las causas primarias que generan los eventos iniciantes: Sin embargo en este estudio

existió incertidumbre respecto a causas que no se especificaron y que por tanto no permiten presentar un panorama claro de causas primarias.

✓ Se detectó que las fallas en bombas tienen una frecuencia de ocurrencia alta especialmente en la generación de escapes de vapores de hidrocarburo con un porcentaje de ocurrencia del 77%, principalmente por las fugas en los sellos y empaques.

✓ Los derrames de hidrocarburos al río Magdalena a través del colector sur son generalmente ocasionados por deficiencia o fallas en los sistemas de separación agua –hidrocarburo, por tanto para disminuir la cantidad de barriles vertido a esta fuente hídrica es necesario implantar mayores controles sobre estos equipos y realizar labores constantes de mantenimiento y limpieza en la operación normal.

✓ Aunque se creía que el daño por corrosión en los elementos de las cimas de las torres iba a tener una alta frecuencia de ocurrencia no se encontró en este estudio evidencia objetiva sobre esta causa. Como de hecho las sustancias corrosivas dentro del crudo son inevitables, se evidencia que los controles para la corrosión ya sea por remoción de sales en el desalador y por neutralización en la cima, han sido efectivos en el periodo de reportes.

✓ En el transcurso de esta investigación se validó la gran mayoría de causas esperadas, aparecieron nuevas y otras se dejaron a un lado por falta de evidencias objetivas, sin embargo el hecho que no aparezcan en este estudio no significa que no sucedan o no se puedan presentar, lo único que podría sugerir es que su magnitud es muy pequeña y por tanto se han obviado por las personas de operaciones que realizan el registro de incidentes o quizás por su alta frecuencia se han convertido en otra actividad más dentro de su jornada laboral.

Eventos Iniciales Principales

✓ Respecto a los eventos iniciantes se encontró para el periodo de 2 años comprendido entre el 14 de Septiembre de 2003 y 14 de Septiembre de 2005 297 incidentes .La mayoría estuvo representada por la liberación de hidrocarburos livianos a las teas con un 39.7%, el escape de hidrocarburos en fase vapor con un porcentaje de 16.2, el derrame de hidrocarburos líquidos con un porcentaje de 13.5 y el 10.4% correspondiente a sobrepresión y ebullición de líquidos en líneas y tanques de recibo de producto.

✓ Se encontró pruebas de la aparición de superficies calientes y presencia de llama en los patios de las plantas de destilación de crudo, especialmente por trabajos en caliente y por recalentamiento de las bombas,; Estas situaciones demandan revisión y control en el corto plazo, su existencia aumenta la probabilidad que se presente un incendio especialmente por la frecuencia de derrames y escapes encontrados en este estudio.

✓ Analizando el sistema de la torre atmosférica se encontró que los productos que presentan mayor cantidad de escapes son en orden descendente el Diesel, el

Crudo Reducido y la Nafta con porcentajes de 22.9, 18.8 y 8.3 respectivamente. Por su parte respecto a incendios el crudo reducido presenta mayor ocurrencia con 23.8% seguido del gasóleo atmosférico y el Diesel con 14.3 y 9.5% respectivamente.

✓ Aunque no es el alcance de esta monografía el análisis de las corrientes de la sección de vacío se debe mencionar que los hidrocarburos con mayor evidencia de derrames en esta torre son los gasóleos pesado y liviano con porcentajes de fuga de 27.5% y 20% respecto al total de derrames (40). Por otro lado el mayor porcentaje de incendios se encuentra relacionado con el gasóleo pesado teniendo un 23.8%.

Eventos Amenazantes Principales

✓ Los eventos amenazantes que evidenciaron mayor frecuencia de ocurrencia en las plantas de Topping fueron la liberación de hidrocarburos Livianos a la Atmósfera, el incendio de hidrocarburos líquidos que puede ser por piscina o por llamarada, el incendio de vapores del tipo piscina, chorro y/o Lllamarada y el derrame contaminante de Hidrocarburos al Río Magdalena.

✓ En esta investigación no se detectó posibilidad de ocurrencia de los eventos amenazantes de explosión debido a que para el desarrollo de estos se necesitan ciertas condiciones de descarga como cantidad de masa (para generar explosiones no confinadas) superior a 1000Kg que no se contempla suceda en las plantas de Topping, debido a las cargas relativamente bajas que se manejan y a la naturaleza de los fluidos a descargar.

✓ El escape de hidrocarburos en fase vapor puede desencadenar principalmente incendios por chorro de fuego y llamarada como se muestra en los árboles de eventos usados en este estudio. Por su parte, los derrames líquidos pueden desarrollarse principalmente como piscina de fuego y llamarada.

✓ Todos los reportes relacionados con derrames al río Magdalena se consideraron como eventos amenazantes debido a las consecuencias de contaminación y mala imagen para la empresa, por tanto el 100% de este evento iniciante se desencadenó como evento amenazante.

✓ Respecto a la liberación de hidrocarburos livianos a la atmósfera se encontró que su frecuencia de ocurrencia no fue más alta de lo encontrada debido al control que se realiza en operaciones con el recibo de gases por otras plantas de cracking.

✓ En los reportes de los 2 años analizados todos los incendios que se produjeron fueron menores y/o conatos por lo que sus consecuencias fueron insignificantes comparadas con el potencial que puede tener este evento amenazante.

✓ Todos los eventos amenazantes evaluados presentaron las calificaciones más altas respecto a la frecuencia de ocurrencia delimitada por la vida útil estimada de la planta de 30 años, debido a que su ocurrencia se determinó en un periodo de

2 años y todos durante este tiempo se presentaron más de una vez. Sin embargo, debido a las bajas consecuencias que se han presentado en los incendios de las topping este parámetro se modificó en la valoración del riesgo pues las consecuencias se estimaron con una magnitud de catástrofe debido a las condiciones extremas del modelamiento de las distancias de afectación.

Principales Consecuencias

✓ Los escenarios que se modelaron con PHAST para la determinación de las distancias de afectación involucraron tres tipos de roturas bajas, medias y mayores y se realizaron para los tres tipos de corrientes con mayor frecuencia de fugas que fueron Crudo Reducido, Diesel y Nafta antes y después de las bombas pues estos elementos son los que mas presentan fugas. . El programa PHAST como licencia corporativa de Ecopetrol, debe ser utilizada con mayor frecuencia en la operación para poder contar con valores y distancias de afectación.

✓ Los escenarios de eventos amenazantes que tendrían el mayor impacto dentro de la unidad U-200 y en general sobre las unidades de Topping son los chorros de fuego de Nafta tanto en la descarga como en la succión con diámetro de orificio de 1 pulgada, la piscina de crudo reducido con diámetro de descarga de 0.5 pulgadas en la descarga y los chorros de fuego de Diesel en la descarga de la bomba con diámetros de orificio de 0.5 y 1 pulgada, los cuales mostrarían distancias de afectación entre 41.4m y 96.7m a partir del elemento con fuga tomando la radiación térmica mas crítica de 37.5 KW/m^2 .

✓ De acuerdo con la modelación en PHAST se encontró que el evento que involucra al Crudo Reducido con mayor distancia de afectación sobre la planta es el incendio de piscina el cual cubre una distancia de 41.4 metros en los cuales la intensidad de la radiación térmica es de $>37.5 \text{ KW/m}^2$ nivel de radiación en el que se que produciría una pérdida total en equipos y una probabilidad de fatalidad del 99% en el personal expuesta.

✓ Para determinar las pérdidas económicas por daño total de equipos solo se consideraron los equipos principales de la unidad U-200 es decir, torres, intercambiadores, bombas y tanques pues la intención de esta investigación fue dar una estimación aproximada de las pérdidas sin llegar a entrar en detalle, por tanto para mayor profundidad se recomienda hacer un inventario detallado por áreas de afectación enfatizando en la longitud de las tuberías y la cantidad de instrumentos de medición y control para complementar la información que aquí se presentó.

✓ No se pudo realizar una estimación de costos de los tanques de almacenamiento por falta de información en las hojas de especificaciones respecto a dimensiones y materiales por lo que fue imposible estimar la pérdida de económica para este ejercicio académico, por tanto el valor total estimado por pérdida de equipos no incluye el daño total a tanques.

✓ El incendio producido por el derrame de Crudo reducido como piscina genera un área circular de afectación con radio de 41.4m por tanto este evento es el que

presenta las mayores pérdidas económicas en la unidad U-200, ya que su origen es en la bomba P-204C/D y al trazar este radio en las instalaciones de esta planta casi todos los equipos se verían afectados incluyendo las torres y los hornos que son los equipos de mas importancia y de mayor costo.

✓ Se encontró que además de las afectaciones sobre el área de la U-200 los eventos amenazantes modelados impactarían las instalaciones de la unidad U-250 debido a que es el vecino inmediato en la dirección del viento. Por lo anterior, se recomienda realizar el inventario de equipos para esta unidad que se verían destruidos por los eventos para así determinar una aproximación más real de las pérdidas que tendría ECOPETROL S.A. en la refinería de Barrancabermeja, que por el alcance de este estudio no se contemplaron. El evento que tendría mayor impacto sobre la U-250 sería el de chorro de Nafta con diámetro de escape de 1" en la descarga de la bomba P-202C/D con un área sobre la U-250 de longitud 53.85 m en dirección del viento.

Recomendaciones Operativas

✓ Respecto a la liberación de hidrocarburos a la tea es importante considerar que cualquier irregularidad en el compresor C-245 ubicado en la unidad U-200 genera impactos en la emisión de compuestos contaminantes a la tea, Este elemento para la Topping 200 requiere mayor análisis de comportamiento operacional . Adicionalmente se recomienda tener un plan de contingencia que pueda suplir la deficiencia o falta de este equipo.

✓ El constante de fallas en los instrumentos de medición y control así como las válvulas, dando origen a los eventos iniciantes como derrames, escapes y liberación de hidrocarburos a la tea hace necesario tener un plan de revisión y monitoreo específico sobre estos elementos, que se pueden convertir en recurrentes detonantes de accidentes mayores.

✓ La presencia de compuestos tóxicos en el ambiente dentro de las plantas de Topping se evidenció con los reportes de incidentes relacionados con el ácido sulfhídrico, aunque la cantidad de reportes no fue muy elevada, se recomienda verificar que el personal se encuentra preparado para actuar con los primeros auxilios en una posible intoxicación . Se recomienda hacer monitoreos constantes para conocer con mayor precisión la concentración de dicha sustancia en las plantas y poder a tomar medidas con respecto a los posibles efectos de este gas a bajas concentraciones.

✓ En relación con la salida de servicio del desalador, en el portal de incidentes se observa como una constante, lo que puede haber provocado un mayor gasto en el consumo de químicos que ataquen los compuestos corrosivos y que protejan los materiales de las cimas: Se sugiere entonces hacer un balance económico entre los gastos que genera mantener el desalador en servicio y comprar productos neutralizantes e inhibidores para observar el impacto económico por esta causa.

Valoración del Riesgo

✓ Se encontró que en la valoración del riesgo con la Matriz RAM que para cada uno de los eventos amenazantes que se han desarrollado en los 2 últimos años en las unidades de topping de Barrancabermeja, los efectos sobre el ambiente y la pérdida de imagen por vertimiento de hidrocarburos líquidos y gaseosos son los que presentan la mayor valoración (Media) y que por el contrario a lo que se podría pensar los eventos de incendio que se han dado no presentan en la matriz RAM un riesgo considerable sino uno muy bajo que puede ser controlado fácilmente.

✓ El riesgo total de cada uno de los eventos amenazantes usando la Matriz llamada de investigación que se podrían desarrollar en las unidades de topping de Barrancabermeja, mostró que las pérdidas económicas no representan un riesgo mayor comparado con lo que significa la existencia de una fatalidad por motivo de una actividad industrial. Sin embargo a pesar de que es posible la existencia de fatalidades la probabilidad de que dichos eventos ocurran y tengan esa magnitud de consecuencias es muy improbable de ahí que la valoración del riesgo se mitigue sustancialmente, aunque no deja de tener una calificación media por lo que se debe implementar mecanismos en todos los niveles de la organización que puedan mitigar estas consecuencias.

Sobre la Metodología de Valoración del Riesgo

✓ La metodología utilizada en la Monografía permitirá a la administración y operación, intervenir el riesgo en las 2 variables componentes, es decir frecuencia de ocurrencia y magnitud de las consecuencias.

✓ La Matriz RAM ofrece valoraciones cualitativas básicas, lo desarrollado en la presente investigación ofrece mayores argumentos técnicos para la toma de decisiones, debido a que contempla la determinación cuantitativa de consecuencias.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BETANCUR, Ana María. Evaluación de Riesgos –Planes de Contingencia, Salud Ocupacional. Bucaramanga, Especialización en Ingeniería Ambiental. 2004

[2]CARDONA, Omar Dario. Plan de Capacitación Institucional en Gestión de Riesgos. 1ª ed. Santo Domingo: Secretariado Técnico de la Presidencia, 2001

[3]COBURN, A.W. & SPENCE, R.J.S. Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo: Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres. 1ª ed. Cambridge: DHA,1991)

[4] FELIZIA, Eduardo. Centrales Nucleares: La Evaluación Probabilística de su Seguridad. Ciencia Hoy, Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación Ciencia Hoy. Volumen 5 – No. 35 – 1996

[5] KRAUS, Richard S. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Capítulo 78: Industrias Químicas, Petróleo y Gas Natural, pág 1-33.

[6] LEES, Frank P. Loss Prevention in the Process Industries. Volumen 1. Butterworths, 1980.

[7] STORCH DE GRACIA, J.M. Manual de Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Petroleras. 1ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998

[8] <http://www.sire.gov.co/websire/Tecnologico/medidas.htm>

[9] <http://www.matche.com>

ANEXOS

ANEXO 1. COMBUSTIBLES PRODUCIDOS EN COPETROL A BASE DE PRODUCTOS ATMOSFÉRICOS DE LAS UNIDADES DE DESTILACIÓN DE CRUDO

1.1. GASOLINA EXTRA (A base de Nafta)

IDENTIDAD Y USOS
NOMBRE: GASOLINA MOTOR EXTRA
OBTENCION Y USOS: La gasolinas extra es un combustible proveniente de nafta obtenidas por procesos de destilación atmosférica, ruptura catalítica y otros. Las naftas son tratadas químicamente para eliminar compuestos azufrados indeseables, tales como sulfuros y mercaptanos, causantes de corrosión y se mezclan en forma tal que se obtiene un número de octano de investigación (RON) de 94 mínimo. Se incorporan también aditivos químicos con el fin de mejorar las propiedades de estabilidad de la oxidación y protección contra la corrosión y el herrumbre importantes para evitar variaciones en su calidad durante el almacenamiento en planes de abasto, estaciones de servicio y depósito de vehículos; Está diseñada para ser usada como combustible en motores de combustión interna de alta relación de compresión (superior a 9:1) de acuerdo con la recomendación del fabricante.
ROMBO DE SEGURIDAD RIESGO DE INFLAMABILIDAD 3, RIESGO PARA LA SALUD: 1 RIESGO DE REACTIVIDAD 0
OTRO NOMBRE: GASOLINA TIPO 92; PETROL
DATOS FISICO-QUIMICOS
INFLAMABLE: SI, OXIDANTE: NO, CORROSIVO: NO
EXPLOSIVO: NO, TOXICO: SI, ASFIXIANTE: NO
IRRITANTE: NO, RADIOACTIVO: NO
APARIENCIA Y OLOR: Líquido amarillento de olor penetrable.
SOLUBILIDAD EN AGUA (% PESO): Ninguna. Soluble en alcohol absoluto, eter, cloroformo y benceno
ESTADO FISICO: VELOCIDAD DE EVAPORACION (Butil Acetato = 1): > 1
PUNTO DE EBULLICION (760 mm Hg): 37.8-204.0°C
PRESION AL VAPOR (37.8°C): 75.8 Kpa
GRAVEDAD ESPECIFICA: 0.8 PUNTO DE CONGELACION: -60 A -90 °C
SENSIDAD DEL VAPOR (aire =1): 3.0 - 4.0
REACTIVIDAD
ESTABLE: SI
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE: Calor excesivo, llama y otras fuentes de ignición.
INCOMPATIBILIDADES (material para evitar): Reacciona violentamente con el tetrafluoruro de bromo, cloro, dióxido de cloro, Trifluoruro de nitrógeno y oxígeno líquido.
POLIMERIZACION PELIGROSA: NO OCURRIRA
DATOS SOBRE RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION
PUNTO DE INFLAMACION (método utilizado): -43°C
PUNTO DE AUTOIGNICION: 280 - 456.1°C

LIMITES DE INFLAMABILIDAD (% volumen): INFERIOR (LEL): 1.4, SUPERIOR (UEL): 7.6	
MEDIO EXTINGUIDOR: Espuma, dióxido de carbono, polvo químico seco. NUNCA utilice agua, empléela únicamente para enfriar los recipientes expuestos al fuego.	
PROCEDIMIENTO ESPECIAL PARA COMBATE DE INCENDIOS: Los bomberos deben utilizar equipo de respiración autocontenido.	
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Los vapores de gasolina son más pesados que el aire, por lo tanto se acumulan en lugares bajos, si estos encuentran una fuente de ignición tal como una estufa caliente, un filamento de una bombilla eléctrica, o una chispa eléctrica, los vapores se inflamarán propagándose inmediatamente.	
DATOS SOBRE RIESGOS PARA LA SALUD	
RUTAS DE EXPOSICIÓN:	
INGESTION: NO INHALACION: NO ABSORCION: NO CONTACTO: NO OJOS: NO	
EFFECTOS AGUDOS: Los síntomas por inhalación de los vapores van desde dolor de cabeza, mareo, visión borrosa, somnolencia, confusión mental e incoordinación, hasta (en casos severos) coma, endema pulmonar, y posiblemente la muerte. La inhalación repetitiva de los vapores de la gasolina (por exposición crónica) puede causar anemia, irritabilidad y lesiones en los nervios de las extremidades. La ingestión de esta sustancia produce irritación en la boca, garganta y estómago, tos, náuseas, vómito, somnolencia, estupor, convulsiones y daño renal. Durante el vómito se corre el riesgo de aspirar la gasolina dentro de los pulmones donde causa una lesión inmediata con peligro de muerte por endema pulmonar. El contacto con los ojos causa irritación y ardor, pero generalmente su efecto es temporal. El contacto frecuente y prolongado con la piel produce resecaamiento, escamosidad y rajaduras. La manifestación de estos síntomas depende del grado e sensibilización del individuo.	
CONDICIONES MEDICAS AGRAVADAS POR SOBREXPOSICION:	
Medidas de primeros auxilios:	
INGESTION: No debe practicarse lavado gástrico. El aceite de oliva disminuye la absorción de hidrocarburos. No debe Inducirse al vómito por peligro de aspiración.	
INHALACION: Traslade la víctima hacia un lugar fresco. Manténgala abrigada y en reposo. Suministre oxígeno. Manténgala bajo vigilancia médica.	
PIEL: Quite rápidamente la ropa y calzado contaminados. Lave el área afectada con abundante agua y jabón.	
OJOS: Lávelos con abundante agua durante 15 minutos	
CARCINOGENICO: NO	EMBRIOTOXICO: NO
MUTAGENICO: NO	TERATOGENICO: NO
MEDIDAS PREVENTIVAS	
PROTECCION PERSONAL	
PROTECCION RESPIRATORIA: Equipo de aire autocontenido debe ser usado en áreas con deficiencia de oxígeno.	
GUANTES PROTECTORES: De nitrilo o neopropeno.	
PROTECCION OCULAR: Gafas de seguridad.	
CONTROLES DE INGENIERIA ESPECIFICOS	
VENTILACION LOCAL EXHAUSTIVA: Extractores generales y locales.	
PRECAUCIONES DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO	
AREAS: Bien ventiladas, alejadas del calor, de las fuentes de ignición y de los fuerte agentes oxidantes. No se debe fumar en las áreas de trabajo.	
RECIPIENTES: Que no sean de vidrio. Bien cerrados. En los tanques debe dejarse suficiente espacio para cubrir cualquier aumento del volumen con el incremento de temperatura física.	
CODIGO DE COLORES PARA ALMACENAMIENTO: ROJO (Inflamable)	

OTROS: No deben almacenarse recipientes vacíos por peligro de explosión. No debe permitirse fumar. Las luces descubiertas o cualquier fuente de incendio en los sitios de almacenamiento o venta de los combustibles y las áreas de almacenamiento deben tener avisos indicativos

PROCEDIMIENTO EN CASO DE DERRAMES Y FUGAS

Elimine toda fuente de ignición. Evacúe las zonas bajas. Aisle el área y manténgase a favor del viento. En caso de grandes derrames, arrastrar con agua hacia los sistemas de aguas aceitosas. Se deben prevenir escapes de gasolina ya que pueden formar nubes explosivas. Puede utilizar un absorbente como arena o tierra. Si el derrame es muy grande se sugiere que intente recuperarlo.

PROCEDIMIENTO PARA DISPOSICION DE RESIDUOS

Cualquier cantidad de tierra o arena contaminada debe almacenarse en recipientes a prueba de fuego para que sean desechados más tarde

1.1. GASOLINA CORRIENTE (A base de Nafta)

IDENTIDAD Y USOS
NOMBRE: GASOLINA CORRIENTE
OBTENCION Y USOS: Es un combustible proveniente de nafta obtenida por procesos de destilación, ruptura catalítica y otros. Las naftas son tratadas químicamente para eliminar compuestos azufrados indeseables, tales como sulfuros y mercaptanos, causantes de corrosión y se mezclan en forma tal que se obtiene un número de octano de investigación (RON) de 86 mínimo. En Colombia también se le conoce como gasolina corriente. Esta gasolina está diseñada para ser usada como combustible en motores de combustión interna de baja relación de compresión (8:1 a 9:1) de acuerdo con la recomendación del fabricante.
ROMBO DE SEGURIDAD RIESGO DE INFLAMABILIDAD 3, RIESGO PARA LA SALUD: 1, RIESGO DE REACTIVIDAD 0
OTRO NOMBRE: GASOLINA TIPO 80; PETROL
DATOS FISICO-QUIMICOS
INFLAMABLE: SI OXIDANTE: NO CORROSIVO: NO
EXPLOSIVO: NO TOXICO: SI ASFIXIANTE: NO
IRRITANTE: NO RADIOACTIVO: NO
APARIENCIA Y COLOR: Líquido amarillento de olor agradable.
RANGO DE EBULLICION (760 mm Hg): 37.8 - 204.4°C PRESION AL VAPOR (37.8°C): 75.8 Kpa
GRAVEDAD ESPECIFICA: 0.8 PUNTO DE CONGELACION: -60 A -90°C
DENSIDAD DEL VAPOR (aire = 1): 3.0 - 4.0
REACTIVIDAD
ESTABLE: SI
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE: Es estable bajo condiciones de almacenamiento y de uso normal. Calor, chispas y otras fuentes de ignición. Al contacto con resinas naturales, grasas y aceites, las disuelve.
INCOMPATIBILIDADES (material para evitar): Sustancias oxidantes.
POLIMERIZACION PELIGROSA: PUEDE OCURRIR

DATOS SOBRE RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION	
PUNTO DE INFLAMACION (Método utilizado): -43°C	
PUNTO DE AUTOIGNICION: 280 - 456.1°C	
LIMITES DE INFLAMABILIDAD (% volumen): INFERIOR (LEL): 1.4 SUPERIOR (UEL): 7.6	
MEDIO EXTINGUIDOR: Espuma, dióxido de carbono, polvo químico seco. NUNCA utilice agua, empleela únicamente para enfriar.	
PROCEDIMIENTO ESPECIAL PARA COMBATE DE INCENDIOS: El personal debe emplear respiradores cuando combate el fuego. Si es posible, debe cerrarse el flujo de combustible en su origen.	
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Los bomberos deben usar equipo de respiración autocontenido.	
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Los vapores de gasolina son más pesados que el aire, por lo tanto se acumulan en lugares bajos. Si estos encuentran una fuente de ignición tal como una estufa caliente, un filamento de una bombilla rota, o una chispa eléctrica, los vapores se inflamarán propagándose inmediatamente.	
DATOS SOBRE RIESGOS PARA LA SALUD	
RUTAS DE EXPOSICIÓN:	
INGESTION: NO INHALACION: NO ABSORCION: NO CONTACTO: NO OJOS: NO	
EFFECTOS AGUDOS: La permanencia prolongada en atmósfera saturada de disolventes causa trastornos fisiológicos, presentándose asfixia y lesiones en los tejidos pulmonares. Los vapores tienen un bajo grado de toxicidad, pero las nieblas pueden producir neumonía química. En altas concentraciones los vapores son irritantes y anestésicos. Las concentraciones anestésicas están sobre 1000 ppm y los efectos irritantes dan aviso de proximidad a más altas concentraciones. Tienen bajo orden de toxicidad por ingestión oral. Sin embargo cantidades minúsculas que se aspiren y subsecuentemente produzcan vómito pueden provocar daños severos en los pulmones. Es ligeramente irritante en los ojos pero no daña sus tejidos. En forma líquida tiene baja toxicidad, pero el contacto prolongado y repetido con la piel puede irritarla causando dermatitis.	
CONDICIONES MEDICAS AGRAVADAS POR SOBREXPOSICION: Medidas y auxilios INGESTION: Mantenga a la víctima abrigada y en reposo. No induzca al vómito. INHALACION: Aleje inmediatamente a la víctima del área contaminada. Suministre respiración artificial en caso de paro respiratorio. PIEL: Quite la ropa contaminada. Lave la piel afectada con abundante agua y jabón. OJOS: Enjuáguelos con abundante agua durante unos 15 minutos.	
CARCINIGENICO: NO	EMBRIOTOXICO: NO
MUTAGENICO: NO	TERATOGENICO: NO
MEDIDAS PREVENTIVAS	
PROTECCION RESPIRATORIA: Con cartucho para vapores orgánicos. En caso de emergencia o no rutinarios se requieren respiradores autocontenidos.	
GUANTES PROTECTORES: De neopreno o nitrilo.	
PROTECCION OCULAR: Gafas de seguridad.	
OTRAS: Los guantes se deben reemplazar si se han contaminado con el combustible. La ropa de trabajo debe cambiarse regularmente y lavarse por cualquier proceso.	
CONTROLES DE INGENIERIA ESPECIFICOS	
VENTILACION LOCAL EXHAUSTIVA: Extractores generales y locales.	

PRECAUCIONES DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO
AREAS: Bien ventiladas, alejadas del calor, de las fuentes de ignición y de fuertes agentes oxidantes. No se debe fumar en las áreas de trabajo.
RECIPIENTES: Que no sean de vidrio. Bien cerrados. En los tanques debe dejarse suficiente espacio para cubrir cualquier aumento de del volumen con el incremento de temperatura física.
CODIGO DE COLORES PARA ALMACENAMIENTO: ROJO (Inflamable)
OTROS: Deben almacenarse recipientes vacíos por peligro de explosión. No debe permitirse fumar, las luces descubiertas o cualquier fuente de incendio en los sitios de almacenamiento o venta de los combustibles y las áreas de almacenamiento debe tener avisos indicativos.
PROCEDIMIENTO EN CASO DE DERRAMES Y FUGAS
Elimine toda fuente de ignición. Evacue las zonas bajas. Aisle el área y manténgase a favor del viento. En caso de grandes derrames, arrastrar con agua hacia los sistemas de aguas aceitosas. Se deben prevenir escapes de gasolina ya que pueden formar nubes explosivas. Puede utilizar un absorbente como arena o tierra. Si el derrame es muy grande se sugiere que intente recuperarlo.
PROCEDIMIENTO PARA DISPOSICION DE RESIDUOS
Cualquier cantidad de tierra o arena contaminada debe almacenarse en recipientes a prueba de fuego para que sea desechados más tarde

1.2. TURBOSING JET A-1 (a base de JET)

IDENTIDAD Y USOS
NOMBRE: TURBOSING JET A-1
OBTENCION Y USOS: Es un destilado medio obtenido de la destilación primaria de mezclas del petróleo crudo, especialmente seleccionadas. Por sus características muy particulares de calidad es tratado químicamente para eliminar compuestos indeseables azufrados tales como sulfuros y mercaptanos causantes de la corrosión; resulta adecuado para ser utilizado como combustible en aviones con turbinas a propulsión o jets.
ROMBO DE SEGURIDAD RIESGO DE INFLAMABILIDAD 2 RIESGO PARA LA SALUD: 2 RIESGO DE REACTIVIDAD 0
OTRO NOMBRE: JET A-1; TERMOCOMBUSTIBLE JET A-1
DATOS FISICO-QUIMICOS
INFLAMABLE: SI OXIDANTE: NO CORROSIVO: NO
EXPLOSIVO: NO TOXICO: SI ASFIXIANTE: NO
IRRITANTE: SI RADIOACTIVO: NO
APARIENCIA Y COLOR: Líquido claro
ESTADO FISICO: LIQUIDO
RANGO DE EBULLICION (760 mm Hg): 157 - 300°C PRESION AL VAPOR : < 1 kPa a 20°C
GRAVEDAD ESPECIFICA: 0.7753 - 0.8398 PUNTO DE CONGELACION: ≤ -45°C
DENSIDAD DEL VAPOR (aire =1): 4.5
REACTIVIDAD
ESTABLE: SI
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE: Es estable bajo condiciones de manejo y almacenamiento normal. Calor, chispas llamas abiertas.
INCOMPATIBILIDADES (material para evitar): Cloro, ácido clorhídrico, peróxidos, materiales fuertemente oxidantes.
PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICION: Por oxidación térmica oxidativa se producen óxidos de carbono.

DATOS SOBRE RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION		
PUNTO DE INFLAMACION (Método utilizado): $\geq 38^{\circ}\text{C}$		
PUNTO DE AUTOIGNICION: 228°C		
LIMITES DE INFLAMABILIDAD (%Volumen): INFERIOR (LEL): 0.7 SUPERIOR (UEL): 5.0		
MEDIO EXTINGUIDOR: Agua, espuma, dióxido de carbono o químico seco. Además utilice agua para enfriar los recipientes, estructuras y personal expuestos al fuego.		
PROCEDIMIENTO ESPECIAL PARA COMBATE DE INCENDIOS: Los bomberos deben utilizar aparatos de respiración autocontenidos con máscara facial completa.		
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Los recipientes expuestos al fuego pueden explotar. Los vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire. Se producen humos tóxicos en caso de fuego.		
DATOS SOBRE RIESGOS PARA LA SALUD		
RUTAS DE EXPOSICIÓN:		
INGESTION: NO INHALACION: NO ABSORCION: NO CONTACTO: NO OJOS: NO		
EFECTOS AGUDOS: Puede ser tóxico si se inhala o absorbe a través de la piel. Puede ser irritante en la piel y los ojos. Puede causar náuseas y desvanecimiento. Además puede desplazar el aire, causando asfixia. El vapor puede irritar los ojos, piel y membranas mucosas.		
CONDICIONES MEDICAS AGRAVADAS POR SOBREXPOSICION: EN TODOS LOS CASOS LLAME AL MEDICO.		
CARCINOGENICO: NO	EMBRIOTOXICO: NO	
MUTAGENICO: NO	TERATOGENICO: NO	
PRECAUCIONES DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO		
RECIPIENTES: Bien cerrados.		
PROCEDIMIENTO EN CASO DE DERRAMES Y FUGAS		
Elimine todas las fuentes de ignición. Utilice material absorbente (tierra, arena, toallas de papel); incinere o evapore bajo una campana		

1.3. ACPM O DIESEL (a base de ACPM O DIESEL)

IDENTIDAD Y USOS		
NOMBRE: ACPM		
FORMULA MOLECULAR: (MEZCLA)		
OBTENCION Y USOS: Es un destilado medio obtenido del fraccionamiento o destilación primaria del petróleo crudo, de tal forma que su índice de cetano, el cual mide la calidad de ignición sea de 45 como mínimo. Se utiliza como combustible para motores diesel (en vehículos, plantas eléctricas y calderas).		
RUMBO DE SEGURIDAD		
RIESGO DE INFLAMABILIDAD 2	RIESGO PARA LA SALUD 1	RIESGO DE REACTIVIDAD 0
OTROS NOMBRES: ACEITE COMBUSTIBLE PARA MOTORES; DIESEL FUEL OIL; FUEL OIL No. 2.		
DATOS FISICO-QUIMICOS		
INFLAMABLE: SI	OXIDANTE: NO	CORROSIVO: NO
EXPLOSIVO: NO	TOXICO: NO	ASFIXIANTE: NO

IRRITANTE: SI	RADIOACTIVO: NO	
APARIENCIA Y COLOR: Líquido amarillo pálido un poco viscoso		
PUNTO DE EBULLICION (760 mmHg): 215 - 380°C		
DENSIDAD AL VAPOR (aire = 1): 0.86		
REACTIVIDAD		
ESTABLE: SI		
INCOMPATIBILIDADES (Material para evitar): Oxidantes fuertes		
PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICION: Por combustión puede producir óxidos de carbono e hidrocarburos reactivos.		
POLIMERIZACION PELIGROSA: PUEDE OCURRIR		
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE: El contacto con oxidantes fuertes.		
DATOS SOBRE RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION		
PUNTO DE INFLAMACION (método utilizado): 51°C (124°F)		
PUNTO DE AUTOIGNICION: 230°C (494°F)		
LIMITES DE INFLAMABILIDAD (% volumen): INFERIOR (LEL): 1.3 SUPERIOR (UEL): 6.0		
MEDIO EXTINGUIDOR: Utilice dióxido de carbono, químico seco o espuma, NUNCA debe usarse líquido para apagar incendios relacionados con combustibles para motores porque lo único que se consigue es expandir el fuego. Utilícela solamente para enfriar los recipientes expuestos al fuego y dispersar los gases y vapores.		
PROCEDIMIENTO ESPECIAL PARA COMBATIR INCENDIOS: Los bomberos pueden utilizar aparatos de respiración autocontenidos con máscara facial.		
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Puede emitir sustancias tóxicas e irritantes bajo descomposición térmica. Es peligroso cuando se expone al calor o a las llamas. Los recipientes pueden explotar al calor del fuego.		
DATOS SOBRE RIESGOS PARA LA SALUD		
RUTAS DE EXPOSICIÓN:		
INGESTION: SI	INHALACION: SI	ABSORCION: SI
CONTACTO: NO	OJOS: SI	
EFFECTOS AGUDOS: El respirar gases de combustible de motor puede ser nocivo y causar náuseas, dolor de cabeza, mareo e inconsciencia. Por inhalación puede causar irritación del aparato respiratorio. El principal efecto agudo a altas concentraciones por vía respiratoria es la depresión del sistema nervioso central. Por ingestión puede causar disturbios gastrointestinales. Los síntomas incluyen vómito, náuseas y diarrea. Los efectos incluyen euforia, excitación, dolor de cabeza, desvanecimiento, somnolencia, visión borrosa, fatiga, temores, convulsiones, pérdida de consciencia, coma, interrupción de la respiración y la muerte. La exposición a sus vapores, humos o nieblas pueden causar irritación en los ojos. El contacto repetido o prolongado de la piel puede resultar en la pérdida de las grasas naturales, enrojecimiento, inflamación, comezón, agrietamiento y posible infección secundaria.		
EFFECTOS CRONICOS: Los productos de composición similar han producido cáncer de la piel en animales de laboratorio y han dado resultados positivos en pruebas de sistemas mutagénicos.		

CONDICIONES MEDICAS AGRAVADAS POR SOBREXPOSICION:**Medidas y auxilios****INGESTION:**

No induzca al vómito. Haga rápidamente un lavado gástrico con carbón activado para prevenir la absorción. Dé a beber abundante agua o leche.

INHALACION:

Traslade la persona afectada hacia un sitio fresco, manténgalo abrigado y en reposo. Proporcione oxígeno si hay pérdida de la conciencia.

Suministre respiración artificial si se detiene su respiración.

PIEL: Remueva toda la ropa contaminada y lave la piel con agua y jabón.

OJOS: Lávelos con abundante agua durante 15 minutos.

CARCINIGENICO: SI

EMBRIOTOXICO:

MUTAGENICO:

TERATOGENICO:

MEDIDAS PREVENTIVAS**PROTECCION PERSONAL:****PROTECCION RESPIRATORIA:**

Respirador de media cara y doble cartucho para vapores orgánicos. Para casos de emergencia y no rutinarios, utilice aparatos de respiración autocontenidos.

GUANTES PROTECTORES:

De neopreno. Estos deben reemplazarse si las superficies internas se han contaminado con el combustible.

PROTECCION OCULAR:

Gafas de seguridad.

OTRAS:

La ropa de trabajo debe cambiarse regularmente y lavarse por cualquier método(seco, húmedo o una combinación). Debe disponerse de duchas o estaciones lavaojos.

CONTROLES DE INGENIERIA ESPECIFICOS:**VENTILACION LOCAL EXHAUSTIVA:**

Extractores generales o locales adecuados para evitar la acumulación de vapores peligrosos.

PRECAUCIONES DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO
AREAS: Frescas, secas, bien ventiladas, alejadas de fuentes de calor e ignición de sustancias.
RECIPIENTES: Bien cerrados y debidamente etiquetados, en los tanques debe dejarse espacio suficiente para cubrir cualquier aumento del volumen con el incremento de la temperatura.
CODIGO DE COLORES PARA ALMACENAMIENTO: ROJO (Inflamable)
OTRAS: Utilice herramientas que no produzcan chispas. Los equipos y líneas a tierra usados durante la transferencia reducen la posibilidad de explosión o fuego estático iniciado por chispas. Los recipientes vacíos pueden contener residuos o vapores tóxicos, inflamables / combustibles, o explosivos, por esto no se deben romper, triturar, soldar o reutilizar los recipientes.
PROCEDIMIENTO EN CASO DE DERRAMES Y FUGAS
Mantenga alejada a la gente innecesaria o impida la entrada. Utilice agua en atomizador para reducir los vapores. Aleje toda fuente de ignición. El líquido derramado debe absorberse con arena, tierra u otro material absorbente. Los derrames nunca deben enviarse a drenajes, porque existe el peligro de fuego o explosión. Cualquier cantidad de tierra o arena contaminada debe almacenarse en recipientes a prueba de fuego para su posterior disposición final. Luego lave el área del derrame con agua.
PROCEDIMIENTO PARA DISPOSICION DE RESIDUOS
Sistema de tratamiento de aguas residuales aceitosas. En el caso de arena contaminada llevar a biodegradación

1.4. COMBUSTOLEO PESADO (A base de Crudo Reducido y/o Fondos de Vacío)

IDENTIDAD Y USOS
NOMBRE: COMBUSTOLEO
OBTENCION Y USOS: Es un combustible elaborado a partir de productos residuales obtenidos de procesos de refinación del petróleo crudo. Es un aceite altamente viscoso, empleado principalmente en combustión industrial para lo cual requiere un buen precalentamiento. También se emplea en plantas de generación de energía eléctrica.
REACTIVIDAD
ESTABLE: SI
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE: Es estable bajo condiciones normales de uso. Agentes oxidantes fuertes, calor o llamas.
INCOMPATIBILIDADES (material para evitar): Evite el contacto con agentes oxidantes fuertes.
PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICION: La combustión puede producir monóxido y dióxido de carbono e hidrocarburos reactivos. También puede producir óxidos de azufre (Sox). Por descomposición térmica puede producir ácido sulfhídrico.
POLIMERIZACION PELIGROSA: NO OCURRIRA

ROMBO DE SEGURIDAD
RIESGO DE INFLAMABILIDAD 2 RIESGO PARA LA SALUD: 0
RIESGO DE REACTIVIDAD 0
OTROS NOMBRES: COMBUSTOLEO No. 6; FUEL OIL No. 6; FUEL OIL RESIDUAL.
DATOS FISICO-QUIMICOS
INFLAMABLE: SI OXIDANTE: NO CORROSIVO: NO
EXPLOSIVO: NO TOXICO: NO ASFIXIANTE: NO
IRRITANTE: SI RADIOACTIVO: NO
APARIENCIA Y COLOR: Líquido viscoso de color negro, con olor a aceite de petróleo.
ESTADO FISICO: VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN (Butil Acetato =1): Muy baja
PUNTO DE EBULLICION (760 mm Hg): > 204.4°C PRESION DEL VAPOR (20°C): Despreciable a 37.8°C
GRAVEDAD ESPECIFICA: 1.022 DENSIDAD DEL VAPOR (aire= 1): Más alta.
DATOS SOBRE RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION
PUNTO DE INFLAMACION (método utilizado): 60°C
PUNTO DE AUTOIGNICIÓN: 350°C (662°F)
MEDIO EXTINGUIDOR: Dióxido de carbono, químico seco, espuma. El agua en atomizador o en forma de niebla debe utilizarse como pantalla protectora o para enfriar tanque adyacentes y maquinaria.
RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSION: Los recipientes pueden explotar con el calor del fuego. En el espacio de cabeza de los tanques pueden formarse vapores de los hidrocarburos livianos, esto puede causar riesgo de inflamabilidad / explosión a una temperatura por debajo del punto normal de inflamación del combustible.
DATOS SOBRE RIESGOS PARA LA SALUD
RUTAS DE EXPOSICIÓN:
INGESTION: NO INHALACION: NO ABSORCION: NO CONTACTO: NO OJOS: NO
EFFECTOS AGUDOS: Por ingestión prácticamente no es tóxico. Los síntomas incluyen irritación, náuseas, vómito y diarrea. Por inhalación puede causar irritación del tracto respiratorio y efectos nocivos en el sistema nervioso central. Los efectos incluirán excitación, euforia, dolor de cabeza, desvanecimiento, somnolencia, visión borrosa, fatiga, convulsiones, pérdida de la consciencia, coma, dificultad respiratoria y muerte. Es moderadamente irritante en la piel. El contacto repetido o prolongado puede resultar en pérdida de las grasas naturales, enrojecimiento, picazón, inflamación, agrietamiento y posible infección secundaria. Puede causar reacciones alérgicas en algunas personas. En los ojos es levemente irritante.

CONDICIONES MEDICAS AGRAVADAS POR SOBREXPOSICION:

Se ha indicado que las exposiciones repetidas, prolongadas y excesivas, en particular bajo condiciones de baja higiene puede llevar a desarrollar crecimiento de verrugas que pueden degenerar en cáncer en la piel. Se debe recalcar el hecho de que el cáncer es extremadamente raro y sólo podría presentarse después de muchos años de excesiva exposición.

Medidas y auxilios

INGESTION: No induzca al vómito. Si ocurre espontáneamente verifique el ritmo respiratorio.

INHALACION: Aleje a la persona afectada del sitio de exposición. Si no respira, asegúrese que estén abiertos los conductos de aire y suministre resucitación cardiopulmonar. Si se dificulta suministre oxígeno.

PIEL: Remueva inmediatamente la ropa contaminada. Lave las áreas de contacto con abundante agua y jabón.

OJOS: Lávelos con abundante agua durante unos 15 minutos, incluso bajo los párpados.

CARCINIGENICO: NO

EMBRIOTOXICO: NO

MUTAGENICO: NO

TERATOGENICO: NO

MEDIDAS PREVENTIVAS**PROTECCION PERSONAL****PROTECCION RESPIRATORIA:**

Con cartucho para vapores orgánicos. En caso de emergencia y no rutinarios deben emplearse aparatos de respiración autocontenidos con máscara facial y equipo protector completo.

GUANTES PROTECTORES: De neopreno.

PROTECCION OCULAR: Gafas de seguridad o anteojos químicos.

OTRAS: Se debe disponer de una ducha y estación lavaojos. Dependiendo de las condiciones es necesario utilizar máscara facial, delantal o protectores de brazos. La ropa de trabajo debe cambiarse regularmente y lavarse por cualquier proceso. Sólo deben usarse trapos de limpieza desechables que deben incinerarse. Los trapos y herramientas con aceite no deben colocarse en los bolsillos de la ropa, especialmente en los pantalones.

CONTROLES DE INGENIERIA ESPECIFICOS

VENTILACION LOCAL EXHAUSTIVA: Extractores generales y locales.

PRECAUCIONES DE ALMACENAMIENTO Y MANEJO

AREAS: Frescas, secas, bien ventiladas, lejos del calor, fuentes de ignición y sustancias incompatibles. Debe prohibirse comer, fumar o beber en áreas de uso y almacenamiento.

RECIPIENTES: Bien cerrados y etiquetados. Debe dejarse espacio suficiente en los tanques de almacenamiento para los aumentos de volumen del combustible por altas temperaturas. Los recipientes vacíos pueden contener residuos o vapores inflamables, combustibles y explosivos. No se deben romper, triturar. Taladrar, soldar o reutilizar a menos que se tomen precauciones acerca de estas sustancias.

OTROS: Mantenga limpias las aberturas de tanques y carrotanques. Durante la transferencia deben utilizarse equipo y líneas a tierra para reducir la posibilidad de fuego y explosión estáticos iniciados por chispa.

PROCEDIMIENTO EN CASO DE DERRAMES Y FUGAS

Mantenga alejada a la gente innecesaria. Permanezca tranquilo; alejese de áreas bajas. Aísle las zonas de peligro e limpie la entrada. Evite las llamas, destellos o el fumar en áreas de riesgo. Utilice agua en atomizador para reducir los vapores. En caso de pequeños derrames cubra con tierra u otro material absorbente no combustible que sea compatible, luego lave las áreas del derrame con agua. Las cantidades mayores de combustible deben pasarse a tanques de desechos

ANEXO 2. INDICATIVOS DE INCIDENCIA

FACTIBILIDAD	TAMAÑO	CONTROL	INCIDENCIA
Segura	Grande	Bajo	<i>Alta</i>
		Medio	<i>Alta</i>
		Alto	<i>Media</i>
	Mediano	Bajo	<i>Alta</i>
		Medio	<i>Media</i>
		Alto	<i>Media</i>
	Pequeño	Bajo	<i>Media</i>
		Medio	<i>Media</i>
		Alto	<i>Baja</i>
Probable	Grande	Bajo	<i>Alta</i>
		Medio	<i>Media</i>
		Alto	<i>Media</i>
	Mediano	Bajo	<i>Media</i>
		Medio	<i>Media</i>
		Alto	<i>Baja</i>
	Pequeño	Bajo	<i>Media</i>
		Medio	<i>Baja</i>
		Alto	<i>Baja</i>
Improbable	Grande	Bajo	<i>Media</i>
		Medio	<i>Media</i>
		Alto	<i>Baja</i>
	Mediano	Bajo	<i>Media</i>
		Medio	<i>Baja</i>
		Alto	<i>Baja</i>
	Pequeño	Bajo	<i>Baja</i>
		Medio	<i>Baja</i>
		Alto	<i>baja</i>

ANEXO 3. METODOLOGÍA PROBIT

La metodología Probit relaciona el punto de exposición y el efecto de la radiación térmica y la sobrepresión recibida por un cuerpo con el porcentaje de la población expuesta.

La ecuación general de Probit, para los daños producidos por la radiación térmica es:

$$Pr = A + B \times \ln(t \times q^{4/3})$$

Donde:

Pr: Es una cantidad adimensional que se relaciona directamente con el porcentaje de personas afectadas por el daño específico de la radiación térmica y la sobrepresión (quemaduras de segundo orden, muertes por quemaduras, rotura de tímpanos o daño estructural).

t: Tiempo máximo de exposición de una persona ante la radiación térmica de interés. Se obtiene de la norma API 521 y se introduce en la expresión de Probit, en segundos.

A, B: Corresponden a las constantes del modelo Probit. Estas constantes son adimensionales y dependen del daño de interés. Se obtienen de la literatura especializada y consultada. (Lees, Frank P. Loss Prevention in the Process Industries)

q: Nivel de radiación térmica recibido por una o varias personas como consecuencia de un evento de fuego. El nivel de radiación térmica recibido es función de la distancia del individuo y se trabaja en la expresión de Probit en W/m^2 .

$$\text{Por tanto, } q = \left[\frac{e^{\frac{(Pr - A)}{B}}}{t} \right]^{\frac{3}{4}}$$

El valor de Probit correspondiente al porcentaje de afectación por la radiación térmica se obtiene, según la Tabla A. Esta tabla es válida para analizar el porcentaje de personas afectadas mortalmente por radiación, quemaduras de segundo orden, rotura de tímpanos o lesiones pulmonares y porcentaje de afectación por daños estructurales.

Tabla A. Porcentaje de Personas Afectadas vs Probit

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	---	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
---	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.41	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Esta tabla relaciona el valor Probit con el porcentaje de personas que sufren el daño considerado. La variable correspondiente a la primera fila y a la primera columna se refiere al porcentaje de personas afectadas. Los valores centrales corresponden al equivalente de la expresión Probit (Ej.: El Probit del 57% de las personas afectadas por el daño de quemaduras de segundo grado es 5.18).

✓ QUEMADURAS DE 1er GRADO

Para el porcentaje de personas afectadas por quemaduras de 1er grado sin ropa de protección, la ecuación Probit toma la forma de:

$$Pr = - 39,83 + 3,0186 \times \ln (t \times q^{4/3})$$

siendo q:

$$q = \left[\frac{e^{\frac{(Pr + 39.83)}{3.0186}}}{t} \right]^{\frac{3}{4}}$$

✓ QUEMADURAS DE 2do GRADO

Para el porcentaje de personas afectadas por quemaduras de 2do grado sin ropa de protección, la ecuación Probit toma la forma de:

$$Pr = - 43,14 + 3,188 \times \ln (t \times q^{4/3})$$

siendo q:

$$q = \left[\frac{e^{\frac{(Pr+43.14)}{3.188}}}{t} \right]^{\frac{3}{4}}$$

✓ FATALIDADES

Para el caso del porcentaje de fatalidad de personas que sin ropa estén expuestas a la radiación, la expresión Probit correspondiente es:

$$Pr = - 36,28 + 2,56 \times \ln (t \times q^{4/3})$$

siendo q:

$$q = \left[\frac{e^{\frac{(Pr+36.28)}{2.56}}}{t} \right]^{\frac{3}{4}}$$

ANEXO 4. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE BOMBAS E INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para la estimación de costos en bombas e intercambiadores se usaron dos metodologías, usando valores de la página web www.matche.com y usando el programa de costos de reposición de equipo disponible en la refinería para las unidades de Topping. En este Anexo se registran los parámetros usados en cada metodología por tipo de equipo calculado.

4.1. COSTO DE BOMBAS

Para hallar el costo de las bombas se tomó en cuenta el hecho de la existencia en refinería de motores eléctricos para impulsar los fluidos, por tanto se realizó una estimación de costos para las bombas de acuerdo a lo suministrado por la página web y el costo de los motores eléctricos calculados del programa de la refinería. Finalmente el valor total de las bombas se consideró la suma de estos dos parámetros.

4.1.1. Estimación de Costos de Bombas en www.matche.com

En la página web los parámetros de diseño usados fueron:

- ✓ Tipo de bomba centrífuga
- ✓ Diámetro de la tubería de descarga
- ✓ Material
- ✓ Tipo de Sello

4.1.2. Estimación de Costos de Motores Eléctricos

Esta estimación se realizó en una hoja de Excel donde se encuentra el programa respectivo para el cálculo de costos de motores eléctricos y los parámetros usados fueron:

- ✓ Tipo de Encerramiento
- ✓ Potencia (HP)

4.1. COSTO DE INTERCAMBIADORES

Para hallar el costo de los intercambiadores se usó la página web mencionada y los parámetros requeridos fueron:

- ✓ Tipo de Intercambiador
- ✓ Área en pies cuadrados
- ✓ Material
- ✓ Presión interna

ANEXO 5. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE TORRES DE DESTILACIÓN

La estimación de los costos de las torres de destilación se realizó a través de un método gráfico de cálculo el cual es útil para columnas de destilación atmosféricas y de vacío e incluye dentro de los costos la carcasa de la torre, las cabezas, nozzles, manholes (un manhole entre plato y plato o entre sección empacada), chaqueta y nozzles para calentamiento o enfriamiento medio, platos y tuberías de distribución de flujos internos.

Bases del diseño:

- ✓ Material: Acero al Carbón
- ✓ Temperatura de diseño: 650°F
- ✓ Presión de diseño: 15 psig
- ✓ Altura: 17-133 pies
- ✓ Aplicación : Destilación
- ✓ Tipo de Platos: Válvula
- ✓ Espaciamiento entre platos: 24 pulgadas
- ✓ Espesor del plato: 0.19 pulgadas

La metodología consistió en ubicar los parámetros de diseño específicos de las torres de destilación de la unidad U-200 que se muestran en la Tabla A, haciendo la consideración que todas las torres poseen platos de válvula en la Figura A y gráficamente determinar los costos.

Los costos determinados por esta metodología se consigan en la Tabla A y tan solo ofrecen la determinación de la magnitud del precio de estas torres si fuera necesaria su reposición por daño total.

Figura A. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE TORRES DE DESTILACIÓN

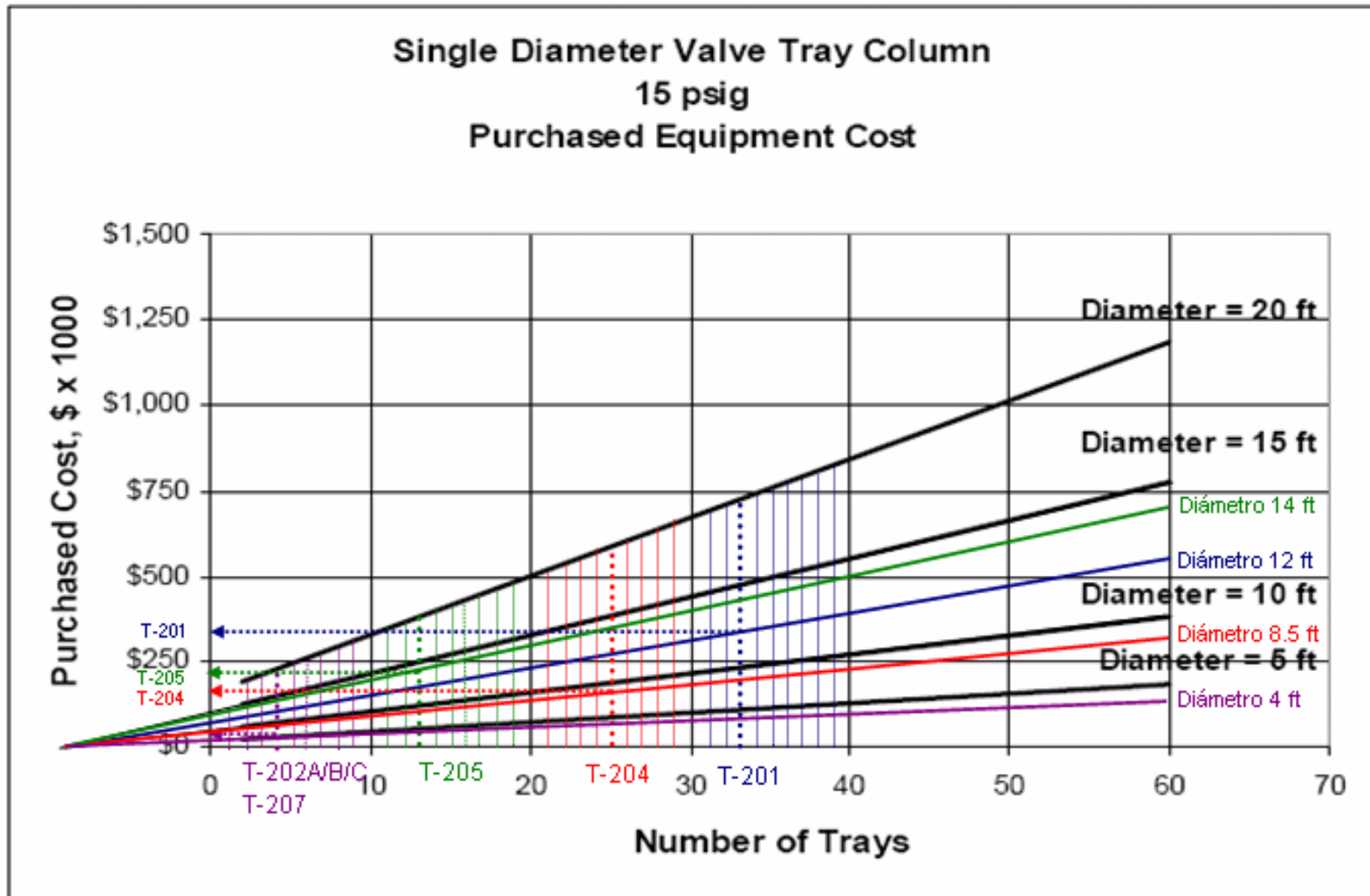


Tabla A. Parámetros de Diseño de las Torres de Destilación de Crudo de U-200

TORRE	DIÁMETRO (ft)	ALTURA (ft)	PLATOS VALVULA	MATERIAL	COSTO (Dólares)
T-201	12	95	33	Acero al Carbón	350000
T-202A	4	37.5	4	-	40000
T-202B	4	37.5	4	-	40000
T-202C	4	37.5	4	-	40000
T-204	8.5	89.49	25	Acero al Carbón	170000
T-207	2.44	17	4	A-285 GR C	20000
T-203A	6	45	1	-	70000
T-203B	6	45	1	-	70000
T-205	14	95.15	13	A-515 GR 60	220000
TOTAL PÉRDIDAS POR TORRES					1'020.000

ANEXO 6. DEFINICIÓN DE GRAVEDAD EN CONSECUENCIA EN AMBIENTE E IMAGEN

6.1. Definición de gravedad en consecuencia en Ambiente

Nro.	Descripción
0	Sin efectos - Sin daño ambiental. Sin modificaciones en el medio ambiente. No requiere remediación.
1	Efectos leves - Daño ambiental leve. Dentro de la Refinería. Acciones de remediación insignificantes.
2	Efectos menores - Contaminación o descarga suficientemente importante para dañar el Medio Ambiente, pero no con efectos duraderos. Una única violación a los límites legales o prescritos ó una única queja.
3	Efectos localizados - Descarga limitada afectando el vecindario y dañando el Medio Ambiente, repetidas violaciones de los límites legales o prescritos ó varias quejas.
4	Efectos mayores - Daños ambientales graves. Se exige a la Refinería que tome medidas importantes para aproximar el medio ambiente contaminado a su estado original. Violaciones prolongadas a los límites legales o prescritos, molestia expandida.
5	Efectos masivos - Persistentes daños ambientales graves o serias molestias que afectan un área extensa, áreas de uso recreativo o de preservación de la naturaleza. Constante y elevada violación de los límites legales o prescritos.

6.2. Definición de gravedad en consecuencia en imagen

Nro.	Descripción
0	Ningún impacto - No es de interés
1	Interna - Puede ser de conocimiento interno a la refinería pero no de interés público.
2	Local Interés público local relativo - Atención de algunos medios de prensa, comunidades y ONGs locales que potencialmente pueden afectar a la Refinería
3	Regional Interés público regional. Gran oposición de los medios locales de prensa. Relativa atención de los medios nacionales de prensa y/o partidos políticos locales/regionales. Oposición de ONGs regionales y del gobierno local
4	Nacional - Interés público nacional. Oposición general de los medios de prensa nacionales. Políticas nacionales/regionales con medidas potencialmente restrictivas y/o impacto en el otorgamiento de licencias. Quejas de ONGs nacionales.
5	Internacional - Interés público internacional. Oposición general de los medios de prensa internacionales. Políticas nacionales/internacionales con un impacto potencialmente grave en las relaciones internacionales de la Empresa, el otorgamiento de licencias y/o la legislación impositiva.

ANEXO 7. INTERPRETACIÓN DEL RIESGO SEGÚN LA VALORACIÓN RAM

Color	Riesgo	Interpretación.
VH	Muy alto	Riesgo intolerable para asumir, requiere buscar alternativa y decide la Gerencia.
H	Alto	Inaceptable, deben buscarse alternativas. Alto riesgo. Si se decide realizar la actividad, deberá implementarse previamente un tratamiento especial en cuanto al nivel de control (Demostrar control de riesgo). Gerencia involucrada en la decisión.
M	Medio	Se deben tomar medidas para reducir el riesgo a niveles razonablemente prácticos, debe demostrarse el control del riesgo.
L	Bajo	Discutir y gestionar mejora de los sistemas de control y de calidad establecidos.
N	Ninguno	Riesgo muy bajo, usar sistemas de control y calidad establecidos.(permisos, 3 Ques, procedimientos, lista de chequeo, responsabilidades y competencias, EPP, etc).