

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Adecuación de los procedimientos de la Metodología del
Árbol de Fallos y Errores (AFE) en la Refinería de petróleo de
Cabaiguán, para su aplicación como técnica para el análisis de riesgo
tecnológico**

Autora: Cheila Caridad Rodríguez Aróstica

Tutores: Dr. Félix Abel Goya Valdivia

Dra. Belkis Fabián Guerra Valdés

Consultante: MSc. Liliana Pérez León

Curso: 2017-2018

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

***Para el logro del triunfo siempre ha sido indispensable pasar por las sendas
de los sacrificios.***

Simón Bolívar

A mi mamá por ser la mayor razón de mi vida y el palpitar de mi corazón.

Eres el tesoro más grande que la vida me ha dado.

*En especial y primeramente a mi mamá por ser la persona más importante y
única en mi vida. Te adoro.*

*A mi tía María Antonia y a mi abuela Eugenia por ser tan lindas y cariñosas
conmigo.*

*A mis tutores Abel, Belkis y Lilibiana por haber sido tan pacientes y atentos
conmigo.*

*A mis profesores y a todo el personal de la universidad por haber estado
presente, mostrarme y guiarme el camino hasta el final.*

*A mi mejor amiga y más que eso, hermana, Aliana por haber sido tan linda
conmigo y demostrarme que la verdadera amistad existe.*

*A mi amiga Arianna por haber estado incontables madrugadas conmigo
estudiando y demostrándome que todo lo que te propongas en la vida se
alcanza.*

*A mis amigos Daileny y Celso por haber tenido su apoyo y las conversaciones
de aliento cada vez que lo necesitaba y hacerme reír tantas veces.*

*A Eric y a su familia por haber estado a mi lado desde que comencé mis
estudios y estar siempre que los necesitabas.*

*A todos los trabajadores de la refinería y en especial los de Dirección Técnica
por haberme brindado siempre su ayuda en cualquier momento. Muchas
gracias.*

***A mis compañeros de aula por haberme apoyado y ver estado a mi lado
durante cinco años.***

***A todas las personas que hicieron posible que este difícil camino de la vida
no fuera muy duro.***

***Y por último y no menos importante a la "Revolución" por haberme abierto
las puertas para hacerme una profesional.***

Resumen

En este trabajo se presenta una propuesta metodológica, con la adecuación de los procedimientos del Árbol de Fallos y Errores (AFE) para su aplicación como técnica para el análisis de riesgo tecnológico, lo que facilita la determinación de la probabilidad del riesgo individual en escenarios de accidente mayor en la industria química, donde se conjugan diversos fallos y errores. La metodología se aplicó a los principales equipos y procesos del área de producción de la Refinería "Sergio Soto Valdés" de Cabaiguán, permitiendo validar la funcionalidad y adecuación de cada uno de los procedimientos metodológicos propuestos, y evaluar la probabilidad del riesgo tecnológico en una instalación de peligro mayor. Los datos utilizados en el caso de estudio fueron seleccionados del análisis de identificación y evaluación cualitativa de riesgos, investigaciones previas en la Refinería, por el método *Hazop (Análisis Funcional de Operabilidad)*. Los resultados obtenidos en este estudio servirán de base a estrategias para la mejora de la fiabilidad de los equipos y sus componentes y la seguridad de esta instalación de alto riesgo.

Abstract

In this paper a methodological proposal is presented, with the adequacy of the procedures of the Tree of Errors and Errors (AFE) for its application as a technique for the analysis of technological risk, which facilitates the determination of the probability of individual risk in scenarios of Major accident in the chemical industry, where various failures and errors are combined. The methodology was applied to the main equipment and processes of the production area of the "Sergio Soto Valdés" refinery in Cabaiguán, allowing to validate the functionality and adequacy of each one of the proposed methodological procedures, and to evaluate the probability of technological risk in a facility of greater danger. The data used in the case study were selected from the identification analysis and qualitative risk assessment, previous investigations in the Refinery, by the Hazop method (Operational Functional Analysis). The results obtained in this study will serve as a basis for strategies to improve the reliability of the equipment and its components and the safety of this high-risk installation.

TABLA DE CONTENIDOS

Introducción 3

Capítulo 1. Estudio bibliográfico 6

1.1. Accidentalidad en la industria química. Generalidades 6

1.2. Accidentalidad en industrias del petróleo cubanas..... 7

1.3. Análisis de riesgos. Métodos..... 8

1.4. Clasificación de los métodos para la evaluación de riesgos 8

1.5. Definición de las áreas de riesgo en la refinería “Sergio Soto Valdés” 14

1.6. Caracterización de las áreas de riesgo de la refinería “Sergio Soto Valdés “de Cabaiguán 15

1.7. Resultados de estudios anteriores en la refinería de petróleo “Sergio Soto Valdés” 16

1.8. Método de análisis “Árbol de Fallos y Errores” 17

1.9. Análisis cualitativo y cuantitativo de los árboles..... 17

1.10. Resolución analítica de los árboles..... 23

1.11. Ventajas y desventajas de los “Árboles de Fallos y Errores” 24

1.12. Conclusiones parciales 25

Capítulo 2. Metodología del AFE para el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la industria química 26

2.1. Definición del problema y establecimiento de condiciones límite..... 27

2.2. Definición del problema y establecimiento de condiciones límite..... 27

2.3. Determinación del daño o condición no deseada a evitar o mitigar, Suceso no deseado 29

2.4. Identificación de causas, Sucesos básicos (SB), que pueden provocar el Suceso no deseado..... 29

2.5. Estimación de la probabilidad o frecuencia esperada para los Sucesos básicos (SB)..... 30

2.6. Identificación de la combinación de fallos, errores o condiciones que puedan conducir al daño, Sucesos Intermedios (SI) y Secuencias..... 33

2.7. Definición del alcance, resolución y reglas generales del Árbol de Fallos y Errores..... 33

2.8. Construcción del Árbol de Fallos y Errores (AFE) 34

2.9. Obtención de los Conjuntos Mínimos de Fallos (CMF)..... 36

2.10. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia del Suceso no deseado..... 38

2.11. Evaluación de las medidas de importancia de los Sucesos básicos (SB) 38

2.12. Evaluación de las actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos (SB) 40

2.13. Representación gráfica y análisis de los resultados..... 41

2.14.	<i>Conclusiones parciales</i>	42
Capítulo 3. Aplicación de la Metodológica del AFE en el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la Refinería “Sergio Soto Valdés”		
3.1.	<i>Definición del problema y establecimiento de condiciones límite</i>	43
3.2.	<i>Determinación del daño o condición no deseada a evitar o mitigar, Suceso TOP</i>	44
3.3.	<i>Identificación de causas, SB, que pueden provocar el Suceso TOP</i>	44
3.4.	<i>Estimación de la probabilidad o frecuencia esperada para los SB</i>	46
3.5.	<i>Identificación de la combinación de fallos y errores que puedan conducir al daño, Sucesos Intermedios (SI) y Secuencias</i>	46
3.6.	<i>Definición del alcance, resolución y reglas generales del AFE</i>	48
3.7.	<i>Construcción de los AFE</i>	49
3.8.	<i>Obtención de los CMF</i>	49
3.9.	<i>Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos TOP</i>	56
3.10.	<i>Evaluación de las medidas de importancia de los SB</i>	56
3.11.	<i>Evaluación de las actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos (SB)</i>	65
3.12.	<i>Representación gráfica y análisis de los resultados</i>	66
3.13.	<i>Conclusiones parciales</i>	70
Conclusiones		71
Recomendaciones		72
Bibliografía		73
Anexos		76

Introducción

El potencial de accidentes industriales mayores, que se ha incrementado de forma significativa con el aumento de la producción, almacenamiento y utilización de sustancias peligrosas, ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con un enfoque sistemático y claramente definido para el control de tales sustancias, a fin de proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente. El análisis de riesgos se ha introducido en determinados estudios universitarios (ingeniería industrial, ingeniería química); al mismo tiempo, esta temática ha pasado a formar parte del conjunto de conocimientos que se supone que un profesional de los sectores relacionados ha de tener en cuenta **(Casal, 1999)**.

En concordancia con el marco legal internacional, la legislación cubana por el **Decreto Ley No.309 del Consejo de Estado (2013)**, y a través **Resolución No.148 del Citma (2013)**, establece los requisitos básicos para el manejo de los riesgos a la seguridad de procesos en instalaciones industriales con peligro de accidente mayor con vistas a reducir la probabilidad de ocurrencia de los mismos, mitigar sus consecuencias y proporcionar un alto nivel de protección a la salud humana, al medio ambiente y a la integridad de las instalaciones etapa de operación de las mismas.

Para poder decidir si el riesgo asociado a una actividad es aceptable o no, se requiere estimar de alguna manera el nivel de peligro potencial, en términos del daño a las personas, a los bienes y al ambiente, así como la *probabilidad* de que tal peligro se materialice. Para ello, se debe llevar a cabo un análisis de riesgo, cuyos resultados permitan tomar las medidas de gestión y/o tecnológicas que se requiera. **(La Norma Británica BS 8800)**.

Para la realización de un análisis cuantitativo de riesgos es necesario obtener la *frecuencia-probabilidad* de que se produzca un determinado accidente, que conjuntamente con el nivel de daño producido definirá el riesgo de la instalación **(Jiménez, abril-2010)**.

El cálculo de consecuencias físicas de un evento o accidente mayor, ha sido intensamente investigado, incluso se dispone de métodos cuantitativos implementados en *software*, como por ejemplo el ALOHA. Mientras que el análisis probabilístico, por su complejidad y grado de incertidumbre, ha quedado más rezagado en lo referente a implementaciones o métodos simplificados, por lo que las principales herramientas siguen siendo analíticas **(Ibarra.E, marzo-2014)**.

La determinación rigurosa de la *frecuencia-probabilidad* de un accidente o suceso no deseado en una instalación, se realiza mediante la construcción de un árbol de fallos y errores, que permita

obtener dicha frecuencia de ocurrencia a partir de las probabilidades de fallo o indisponibilidades de los equipos, así como de los errores en la operación del sistema.

La metodología "Árbol de Fallos y Errores" (AFE), es la denominación dada, con la finalidad de diferenciar los fallos de los equipos, de los errores en el comportamiento humano, definición apropiada para las instalaciones industriales con alto grado de dependencia del factor humano, como es el caso de la industria química y petroquímica **(KIRWAN, 1992)**.

El método del "Árbol de Fallos y Errores" (AFE) tiene sus antecedentes en los procedimientos de la metodología del "Árbol de Fallos" (*FTA: Fault Tree Analysis*), técnica de análisis que ha sido utilizada y perfeccionada por parte de instalaciones nucleares, aeronáuticas y espaciales, extendiéndose su empleo, más recientemente, para la evaluación de riesgos a las industrias electrónica, química y petroquímica, entre otras **(Mujilionov et al., 1979)**.

El **problema científico** de este trabajo se fundamenta en que la aplicación de esta metodología del "Árbol de Fallos y Errores" (AFE) presenta varias dificultades, tales como: exige un alto grado de conocimientos y experiencia de las instalaciones a analizar; dominio del método de análisis; se necesitan de datos históricos propios para disminuir la incertidumbre en la asignación de valores de probabilidad de fallo a los equipos de la instalación que se analiza; y la probabilidad de los errores humanos es un factor muy subjetivo que debe asumirse de manera particular para cada situación e instalación en estudio.

Como parte de la solución del problema científico, se plantea la **hipótesis** que, es posible lograr una nueva metodología, basada en el Árbol de Fallos y Errores (AFE), con la inclusión o adecuación de procedimientos que faciliten su aplicación práctica, que permita determinar la probabilidad de ocurrencia de un accidente mayor, con cierto grado de certidumbre, y contribuya a mejorar la seguridad en instalaciones químicas de alto riesgo.

Objetivo General:

Adequar los procedimientos de la Metodología del Árbol de Fallos y Errores (AFE) para su aplicación como técnica para el análisis de riesgo tecnológico, facilitando la determinación de la probabilidad del riesgo individual en escenarios creíbles de accidente mayor en la industria química, donde se conjuguen diversos fallos y errores.

Objetivos Específicos:

1. Evaluar el estado del arte relacionado con el Análisis Probabilístico del Riesgo en la industria química y la posible utilización del método del Árbol de Fallos y Errores para determinar cuantitativamente la probabilidad de ocurrencia de un accidente mayor.
2. Fundamentar una propuesta metodológica con inclusión de nuevos métodos y procedimientos que permitan análisis probabilístico del riesgo de accidente mayor de forma integral, considerando el Árbol de Fallos y Errores como base de la estructura analítica de la metodología.
3. Validar la funcionalidad de la metodología propuesta en una instalación real, adecuando cada uno de los pasos dentro de los límites razonables de simplificación y comprobando si la estructura metodológica propuesta garantiza el flujo necesario para el análisis de la probabilidad de ocurrencia de un accidente mayor.

Para lograr una mejor organización del **informe de investigación**, se define la siguiente estructura: Resumen; Introducción; Tres Capítulos (se detallan a continuación); Conclusiones; Recomendaciones; Bibliografía y Anexos.

Capítulo 1. Estudio bibliográfico

Se evalúa el estado del arte relacionado con el Análisis Probabilístico del Riesgo en la industria química y la posible utilización del método del Árbol de Fallos y Errores para determinar cuantitativamente la probabilidad de ocurrencia de un accidente mayor, lo que permite fundamentar la nueva metodología desarrollada.

Capítulo 2. Metodología del Árbol de Fallos y Errores para el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la industria química.

Se propone una nueva metodología que adecua los procedimientos de la Metodología del Árbol de Fallos y Errores (AFE) para su aplicación como técnica para el análisis de riesgo tecnológico, facilitando la determinación del riesgo individual en escenarios probables de accidente mayor en la industria química, donde se conjuguen diversos fallos y errores.

Capítulo 3. Aplicación de la Metodológica del Árbol de Fallos y Errores en el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la Refinería “Sergio Soto”.

Se valida la Metodología del Árbol de Fallos y Errores (AFE) y sus modificaciones, aplicando sus procedimientos en el análisis probabilístico del riesgo tecnológico de accidente mayor a los principales equipos y procesos del área de producción de la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán.

Capítulo 1. Estudio bibliográfico

1.1. Accidentalidad en la industria química. Generalidades

La seguridad de procesos debe ser una consideración fundamental en todo el ciclo de vida de una planta química. Debe estar presente en el diseño inicial, en la puesta en marcha y preparación de los manuales operativos, en la operación y mantenimiento, y en el cierre final **(Scodelaro, 05/01/2015)**.

La producción de productos químicos va en paralelo con el crecimiento y el desarrollo industrial en los países; también, se ha incrementado el transporte de sustancias químicas, tanto dentro de los países como a nivel internacional **(Pérez, junio-2006)**.

Los asentamientos humanos muy próximos a las plantas industriales son casi una constante en los países en vías de desarrollo y aumentan la vulnerabilidad de estas personas ante la amenaza de un accidente químico **(Álvarez, 1998)**.

Los productos químicos poseen un riesgo potencial para la salud, por fugas o derrames, ya sea por una situación accidental en las plantas de procesamiento o por errores humanos en el manejo de los mecanismos de seguridad en los complejos procesos industriales **(Salud, 2005)**.

En la industria química de procesos se producen accidentes; un suceso se puede catalogar como accidente si es inesperado, inevitable e indeseado, de entre los que se pueden destacar los escapes tóxicos, explosiones e incendios, teniendo como causas más comunes los fallos de material (una rotura en un depósito de almacenamiento), errores en la operación (operar por encima de los límites de presión o temperatura), perturbaciones externas y fallos humanos **(Santamaría.R and Braña.A.P, 1994)**.

Su objetivo primordial es detectar los peligros presentes en una instalación por comparación con otras similares que hayan tenido accidentes registrados en el pasado. Analizando esos antecedentes es posible conocer las fuentes de peligro, estimar el alcance posible de los daños e incluso, si la información es suficiente, estimar la frecuencia de ocurrencia **(Llopart, junio-2001)**.

A lo largo de los años en todo el mundo, han sucedido numerosos accidentes, desde accidentes en pequeñas industrias hasta en grandes industrias pertenecientes a prestigiosas compañías. En todos los casos han causado pérdidas, ya sea de bienes materiales o vidas humanas, así como graves daños al medio ambiente **(Bodurtha.T.F, 1980) y (King.R, 1990)**.

La rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y la industria química en particular, su gran crecimiento y consecuentemente, el incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un notable impacto sobre personas, medio ambiente y equipo **(Aristides, 1990)**.

Estos riesgos se han puesto de actualidad en las últimas décadas, por desgracia, a causa de algunos accidentes de graves consecuencias. Concretamente en 1984 se registró tres de los accidentes más graves de la historia: Sao Paulo (rotura de una conducción de gasolina, 800 muertos), Ciudad de México (explosión e incendio de un parque de almacenamiento de GLP, 450 muertos) y Bhopal (escape de gas con formación de una nube tóxica, 3000 muertos). En 1989 la explosión de una gran nube de gas, probablemente la mayor de la historia procedente de un escape, provocó la muerte de aproximadamente 1000 personas en los Urales. Respecto al impacto ambiental, en 1986 se registró un grave episodio de contaminación en el Rhin originado por el incendio de una industria química **(Casal et al., 2001)**.

La industria del petróleo está sometida a riesgos de toda especie, cuyo origen puede ser debido a deficiencias técnicas, como averías en el equipamiento tecnológico, a causas naturales imprevisibles, como las tormentas o los incendios, las explosiones, las fallas operacionales o por errores humanos. Un resumen de accidentes industriales relacionados con la industria petrolera acaecidos en el mundo en los últimos años se presenta en la [Tabla 1.1. Anexo 1](#), como se puede apreciar las causas principales de los mismos son las fallas operacionales o los errores humanos **(Delgado, septiembre-2012)**.

1.2. Accidentalidad en industrias del petróleo cubanas

Según plantea el **(Instituto Nacional de Medicina del Trabajo 1990)** y **(Robaina.A.C. and Chig.D., 1995)** en Cuba, los accidentes ocupan el cuarto lugar entre las primeras causas de mortalidad general y en estudios de morbilidad laboral se han encontrado entre las primeras cinco causas de incapacidad. En los últimos años, los sectores de la economía más afectados han sido, la industria, la construcción y el transporte de acuerdo con lo planteado por el **(Anuario Estadístico Nacional, 2005)**.

Las industrias del petróleo cubanas no quedan exentas de tales accidentes, ver [Tabla 1.2. Anexo 1](#) donde se reportan algunos accidentes ocurridos en la UEB de producción de la refinería “Sergio Soto Valdés” de Cabaiguán.

1.3. Análisis de riesgos. Métodos

Este método es similar al análisis de accidentes, aunque no se basa en el estudio de siniestros previos sino en la búsqueda bibliográfica de peligros que puedan hallarse presentes en una nueva instalación a partir de la lista de productos químicos presentes. De forma no estricta se le suele denominar también "**Análisis preliminar de riesgos**". El procedimiento consiste en obtener información completa sobre materiales, sustancias, reactivos y operaciones previstas, comparar estos procesos con otros de los que se tenga experiencia anterior, adaptar esas semejanzas al caso actual y analizar las operaciones y equipos previstos desde el punto de vista de los peligros presentes en cada uno (toxicidad, corrosividad, carga energética, etc.) (**Casal et al., 2001**). Para poder decidir si el riesgo asociado a una actividad es aceptable o no, se requiere estimar de alguna manera el nivel de peligro potencial, en términos del daño a las personas, a los bienes y al ambiente, así como la probabilidad de que tal peligro se materialice. Para ello, se debe llevar a cabo un análisis de riesgo, cuyos resultados permitan tomar las medidas de gestión y/o tecnológicas que se requiera. (**La Norma Británica BS 8800**) define el **análisis de riesgo** como:

Análisis de Riesgo: Es el proceso de estimar la magnitud del riesgo y decidir si dicho riesgo es aceptable o tolerable (**Casal, 1999**).

La importancia del análisis de riesgo, en el contexto de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional, es evidente. Constituye la herramienta que permite identificar los peligros, cuantificar los riesgos y decidir si estos son tolerables, además de evaluar la efectividad de acciones alternativas para reducir los riesgos (**Casal, 1999**).

1.4. Clasificación de los métodos para la evaluación de riesgos

Existen una gran variedad de métodos para la **evaluación de riesgos**, los cuales son clasificados por los autores de formas diferentes. Según (**Zaror.C.A, 2003**) y (**Gracia, 2001**) se clasifican en:

Métodos cualitativos para el análisis de riesgos: Estos emplean diferentes herramientas lógicas y auxiliares, algunos de ellos establecen estructuras lógicas secuenciales, causa/riesgos/efectos que, además de identificar, sirven como trampa para el análisis semicuantitativo o cuantitativos posteriores. Entre los que se encuentran: (**Gracia, 2001**).

- Análisis preliminar de riesgos
- Análisis mediante listas de comprobación (Check List)

- Análisis histórico de riesgos
- Análisis ¿Qué pasa si ¿(What if)
- Análisis de los modos de fallos y sus efectos
- Análisis funcional de operabilidad
- Análisis cualitativo mediante árboles de fallos
- Análisis cualitativo mediante árboles de sucesos
- Análisis de causas y consecuencias

Métodos semicuantitativos para el análisis de riesgos: Estos emplean técnicas de análisis crítico que emplean índices globales del potencial de riesgo estimado a partir de las estadísticas. Éstas pueden ser de disposición general o procedente de la experiencia de las compañías en el diseño y la operación de plantas semejantes a las que se trata de enjuiciar. Este método incluye: **(Gracia, 2001).**

- Análisis de riesgo con evaluación del riesgo intrínseco
- Análisis de los modos de fallos, efectos y criticidad
- Método de Dow: Índice de fuego y explosión
- Método de ICE: Índice de Mond
- Método de UCSIP

Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos: Estos se basan en la aplicación de técnicas de análisis crítico que incluyen estructuras y cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (siniestros) a partir de los valores individuales de la probabilidad de fallo que corresponde a los elementos (equipos y humanos) implicados en los procesos industriales **(Gracia, 2001).**

Índices de Riesgos: Estos son métodos directos y simples para estimar y jerarquizar los riesgos asociados a un proceso. En rigor, no son métodos creados para identificar peligros, pero ayudan a seleccionar áreas donde los riesgos son mayores. Utilizan las características de los materiales utilizados (toxicidad, reactividad, volatilidad, etc.), así como la ubicación y disposición de las unidades en la planta. Para cuantificar valores que permiten una evaluación del nivel de riesgo de la instalación analizada **((INSHT), 1983) y ((INSHT), 1995).**

También es debatido por autores como **(Posada.M, 1999), (Ramos.A, 1990) y (Santamaría.R**

and Braña.A.P, 1994) proponiendo la siguiente clasificación: métodos Comparativos donde incluyen las listas de comprobación, el análisis histórico de accidentes y las normas y códigos de diseño; los métodos generalizados entre los que se destacan el análisis de peligro y operatividad (*Hazop*), “¿Qué sucedería sí...?” (¿What if?) ,el análisis de modalidades de fallas y sus efectos (FMEA), el análisis de árbol de fallas (FTA) y el análisis de árbol de eventos (ETA) y por último los índices de riesgos destacan, entre otros el índice DOW (de Fuego y Explosión), el índice ICI Mond, el índice de exposición química y el índice de peligro de una sustancia **((INSHT), 1983) y ((INSHT), 1995).**

Son métodos de aplicación simple y económica ya que, con la aplicación razonada de una lista de comprobación, se obtienen valores del riesgo intrínseco de la actividad e incluso pueden determinarse los factores que más contribuyen a incrementar este riesgo **(Acosta.D, 2011).**

En las refinerías de petróleo de los métodos ya antes mencionados son aplicables el Hazop, el Índice de DOW, el Índice de Mond, el método UCSIP, el análisis de Árbol de Sucesos y el análisis de Árbol de Fallos y Errores de los cuales se dará una breve explicación a continuación:

La definición dada por la (Chemical Industry Association (Cias51)) sobre el método **Hazop** en su guía es:

“La aplicación de un examen crítico, formal y sistemático a un proceso o proyecto de ingeniería de nueva instalación, para evaluar el riesgo potencial de la operación o funcionamiento incorrecto de los componentes individuales de los equipos, y los consiguientes efectos sobre la instalación como conjunto.”

El mismo es una técnica deductiva para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico. El análisis pretende, mediante un protocolo relativamente sencillo, estimular la creatividad de un equipo de expertos con diferente formación para encontrar los posibles problemas operativos **(Dowell.A and Williams.T, 2005).**

Este método, **(Klett.T, 1992)** se centra en el análisis de las desviaciones de las variables o parámetros característicos de la operación de una instalación respecto de la intención del proceso. La técnica **Hazop** utiliza palabras claves (**no, más, menos**, etc.) que aplicadas a los parámetros de proceso (**caudal, presión, temperatura**, etc.) dan lugar a desviaciones (**más caudal, menos presión**, etc.) de la intención o condición normal del proceso, sin embargo, es un método absolutamente sistemático, porque se controlan todas y cada una de las variables del proceso, en todos y cada uno de los equipos de la planta **(León, 2015).**

El **Índice de Incendio y Explosión** ha sido desarrollado por la empresa DOW y está ampliamente respaldado por el (AIChE) (American Institute of Chemical Engineers) en 1987, permite jerarquizar los riesgos asociados a incendios y explosiones, de diferentes unidades, pero especialmente desarrollado para empresas químicas con un riesgo significativo. El método se puede aplicar tanto a unidades individuales (ejemplo: bomba, compresor, tanque de almacenamiento, reactor), como a agrupaciones de unidades de proceso que representen una clara unidad funcional. Las unidades se seleccionan de acuerdo a su impacto potencial, debido al tipo de materiales que procesan, la cantidad de compuestos peligrosos (presión, temperatura, pH), historial de problemas de seguridad, etc... El mismo tiene por objetivos: cuantificar el daño esperado ocasionado por un incendio o una explosión, identificar los equipos que generan el mayor riesgo potencial y facilitar a la gerencia de seguridad una priorización de las medidas a adoptar (**Santamaría.R and Braña.A.P, 1994**).

El **Índice Dow** se calcula para todas las unidades pertinentes, a partir de factores que reflejan las características de los materiales utilizados y de las condiciones del proceso: el factor de material y el factor de riesgo.

Índice DOW de Fuego y Explosión= Factor Material x Factor de Riesgo

El **Índice Mond** fue desarrollado por Imperial Chemical Industries y la primera versión apareció en el año 1979. La exposición que se hace a continuación se basa en la segunda edición del método, publicada por (ICI en 1985). Es un índice de riesgo de incendio y explosión aplicable a industrias de procesos de gran capacidad productiva. Sin embargo, la toxicidad de los materiales involucrados o de los que posiblemente se generen en un accidente, es contemplada únicamente como un factor agravante en las tareas de control y limitación de la incidencia y no como un posible riesgo en sí mismo.

Este método constituye un desarrollo del índice DOW que amplía el resultado aportando índices parciales para el incendio, la explosión aérea o la que se produce en situaciones de confinamiento (**Llopart, junio-2001**);(**Hernández, 1995**).

El **Índice de la Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Petrole (UCSIP)** fue desarrollado en Francia. Su objetivo es el análisis semicuantitativo de riesgos en términos de probabilidad y gravedad, que se integra en el cálculo del factor de seguridad. Se desarrolló para industrias petroleras, refinerías y plantas petroquímicas, aunque es de fácil adaptación a otras

industrias del sector químico. En líneas generales, se basa en el cálculo de 12 parámetros Pij que definen las características de la instalación, de las operaciones y de las protecciones y que permiten evaluar el factor probabilístico. Asimismo, en función de la energía potencial del sistema, de los accidentes que puedan ocurrir y de su gravedad, se determina el factor de gravedad. Una combinación matemática de estos dos factores generales permite alcanzar el resultado final. Frente a otros métodos antes descritos, es más detallado, especialmente por lo que se refiere a la evaluación de las consecuencias (**Llopart, junio-2001**);(**Larrea.J and Anitua.P, 1994**).

Mediante el **Árbol de Sucesos (ETA)** se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que se desencadena en un tipo de accidente concreto, estableciendo también las probabilidades de ocurrencia, si el conocimiento de los sucesos básicos lo permite. Desde un punto de vista abstracto, es similar al análisis de árboles de fallos. Sin embargo, los sucesos básicos en este caso no son fallos de los sistemas sino alternativas de las diferentes situaciones que pueden darse (“ignición inmediata-ignición retardada”) (**Llopart, junio-2001**).

En este trabajo se utilizan varios términos y definiciones, tomados algunos de la **Resolución 148/2013 del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Citma, 2013)**. A continuación, se relacionan algunos de los más importantes:

Peligro Mayor: Propiedad de ser fuente potencial (o potencialidad) de ocurrencia de accidentes mayores.

Accidente mayor: Cualquier incidente del proceso, como puede ser, una gran fuga, derrame, incendio o explosión, que se produce como resultado de la pérdida de control sobre un determinado proceso durante la operación de una instalación; y que supone un grave peligro para la salud humana y el medio ambiente, ocasionando un grave daño, ya sea inmediato o retardado; tanto dentro como fuera de la instalación, y que involucra uno o más productos químicos peligrosos. Con la potencialidad de ocasionar de conjunto o por separado cualquiera de los sucesos siguientes:

- Muerte, lesiones graves o discapacidad total o permanente a una o más personas como resultado de la pérdida de control de procesos.
- Daño grave al medio ambiente, entendido como pérdida, disminución, deterioro o menoscabo significativo, inferido al medio ambiente o a uno o más de sus componentes, que sea permanente o a largo plazo, cuya recuperación excede del término de tres años y provoque

la pérdida o disminución de la capacidad del ambiente para proporcionar bienes y servicios ambientales.

- Daño severo a la integridad de la instalación o a sus partes componentes.

Instalación con peligro mayor: La totalidad del área de operaciones que se encuentra bajo el control de un determinado titular y en la que están presentes uno o varios productos químicos peligrosos en una o varias unidades o áreas de proceso, incluidas las infraestructuras o actividades comunes o conexas, del tipo y en cantidades suficientes como para constituir fuentes potenciales de accidentes mayores.

Exposición: En este contexto, la exposición se define como la concentración, cantidad o intensidad de un determinado agente físico, químico o ambiental que incide en una población, organismo, órgano, tejido o célula diana, usualmente expresada en términos cuantitativos de concentración de la sustancia, duración y frecuencia (para agentes químicos y microbiológicos) o de intensidad (para agentes físicos como la radiación). El término también se puede aplicar a una situación en la cual una sustancia puede incidir, por cualquier vía de absorción, en una población, organismo, órgano, tejido o célula diana.

Accidente: Evento no planeado que puede derivar en daños graves a las personas (muerte, heridas graves), a la propiedad y al medio ambiente, u otras pérdidas.

Incidente: Evento no planeado que tiene potencial para transformarse en accidente (BS8800). Es un “casi accidente” que se puede identificar como una desviación no planeada de las condiciones de operación, cuyas consecuencias son menores que en el caso de un accidente. Puede tener consecuencias no deseadas en la calidad del producto **(CETESB, 2004)**.

La mayoría de los autores, mezclan el riesgo con el peligro y conceptualmente estos términos tienen significados diferentes, ya que el riesgo es la posibilidad de una consecuencia negativa (daño o pérdida) y el peligro es aquel factor que puede desencadenar una consecuencia negativa, **(Santamaría.R and Braña.A.P, 1994)**.

El Riesgo es la posibilidad de sufrir pérdida o como una medida de pérdida económica o daño a las personas, expresada en función de la probabilidad del suceso y la magnitud de las consecuencias **(Azofra.J.J, 1974)**.

Se consultaron varias bibliografías dentro de ellas las mencionadas anteriormente, resumiendo, en este trabajo se hace referencia a la dada por **(Casal, 1999)** donde plantea que el riesgo es: “situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento”,

o bien “probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial” (entendiendo por peligro una situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio), o aún, “consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra”.

Un tratamiento riguroso del riesgo requiere una definición más precisa que permita su cuantificación. Una definición que cumple estos requisitos y que es utilizada por muchos profesionales, es la basada en el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables **(Química, 1999)**.

Riesgo = frecuencia x consecuencias

donde: R: Riesgo, F: Frecuencia de ocurrencia del suceso, C: Consecuencias más probables

Incendio: Un incendio es una ocurrencia de fuego no controlada que puede abrasar algo que no está destinado a quemarse. Puede afectar a estructuras y a seres vivos. La exposición de los seres vivos a un incendio puede producir daños muy graves hasta la muerte, generalmente por inhalación de humo o por intoxicación y posteriormente quemaduras graves **(Aravena, 2016)**.

Para que se inicie un fuego es necesario que se den conjuntamente tres componentes: combustible, oxígeno y calor o energía de activación, lo que se llama Triángulo del fuego.

Explosión: es la liberación simultánea de energía calórica, lumínica y sonora (y posiblemente de otros tipos) en un intervalo temporal ínfimo. De esta forma, la potencia de la explosión es proporcional al tiempo requerido y su orden de magnitud ronda los gigavatios **(Aravena, 2016)**.

1.5. Definición de las áreas de riesgo en la refinería “Sergio Soto Valdés”

En principio, a los efectos de identificar los peligros probables, se declaran doce áreas generales de riesgo, a partir del estudio del proceso que se realiza en la refinería, ver descripción del mismo en el [Anexo 2](#), con esta información y teniendo en cuenta los productos que se elaboran, almacenan y otros aspectos de interés quedan definidas las siguientes áreas de riesgo ver [Tabla](#)

1.3. Anexo 3

Como se observa en la [Tabla 1.3](#), se tienen en cuenta todas las áreas de riesgo de la refinería, pero solamente en el presente trabajo se analizan un grupo de ellas, seleccionadas en función de las características y cantidades de las sustancias que manipulan y de los procesos tecnológicos que se realizan, dentro de las cuales trabajaremos con las, AR2 (Destilación Atmosférica) y el AR3 (Destilación al vacío) **(León, 2015)**.

1.6. Caracterización de las áreas de riesgo de la refinería “Sergio Soto Valdés “de Cabaiguán

AR2 Planta de Destilación Atmosférica

Unidad 11. Horno F-101

Su objetivo es llevar el crudo a la temperatura requerida, con el consumo mínimo de combustible, de 260-340°C, en función del crudo a refinar y la corrida que se requiera montar y evitando la descomposición química del hidrocarburo.

Unidad 12. Torre de Destilación Atmosférica T-101

La torre de Destilación Atmosférica trabaja con una presión ligeramente superior a la presión atmosférica, con la finalidad de poder condensar parte de los propanos y butanos en el chorro superior. A la torre de Destilación Atmosférica en la zona de alimentación entra el crudo parcialmente vaporizado que sale del horno F-101. La parte vaporizada asciende y el líquido cae en la zona de despojamiento, que posee tres platos de copas en el fondo de la torre.

Los vapores despojados en el fondo, más la parte vaporizada del crudo y el vapor de agua ascienden en la zona de rectificación compuesta por diecisiete platos de copas y un plato de malla. Por los platos ocho y diez se extrae el corte de diésel por cajas de extracción parcial y el queroseno se extrae de los platos trece, catorce, quince y dieciséis igualmente por cajas de extracción parcial. Por el tope de la torre T-101 salen los gases, el vapor de agua y vapores de nafta. El crudo reducido sale del fondo de la misma (**producción, 2015**).

AR3 Planta de Destilación al vacío

Unidad 17. Horno F-102

El crudo reducido que sale del fondo de la torre de destilación atmosférica T-101 es bombeado con la bomba P-109A, B o C gobernada por un control de nivel ubicado en el fondo hasta llegar al horno F-102 donde se calienta entre 340-420°C en dependencia de la operación, vaporizándose parcialmente. En la zona de radiación del horno se puede introducir vapor de agua con vistas a evitar la formación de coque en los tubos del mismo.

Unidad 18. Torre de Destilación al vacío T-102

La función de la torre de Destilación al vacío T-102, es la de producir destilados de alto punto de ebullición, libres de contaminación de metales y asfaltenos. Para poder efectuar esta operación es necesario operar a presión por debajo de la atmosférica para evitar la descomposición de los productos a elevada temperatura.

El producto que sale del horno F-102 pasa a la zona de alimentación de la torre T-102, entre los platos tres y cuatro, que se encuentra a una presión por debajo de la presión atmosférica ocurriendo el *flash* del producto. La torre T-102 está diseñada con veintisiete platos distribuidos de la siguiente manera:

Fondo	tres platos (platos perforados)
Zona de lavado	cinco platos (cuatro de copas y uno de malla)
Zona rectificación	diecinueve platos (diecisiete de válvulas y dos platos colectores)

En esta separación inicial los vapores ascienden en la torre y el líquido cae al fondo. El fondo corresponde a asfalto o petróleo combustible, en dependencia del crudo que se corra, la torre mantiene su nivel de fondo con un lazo en el autómata, accionando la neumática existente en las bombas P-201A o B.

Al fondo de la torre T-102 se retorna parte del flujo del enfriador E-204A, como reflujo frío, con vistas a que la temperatura del fondo esté por debajo de 343°C.

La primera extracción de producto es por el plato siete y por el doce y corresponde a corte lateral sigatoka o I-12 (R2). La segunda extracción de producto es por el plato diecinueve, este puede ser tomado de acuerdo a la corrida como corte lateral de aceite transformador (R3).

La próxima salida es el reflujo al tope, el cual es un reflujo de intervalo. Se toma por el plato veinticuatro a través de la bomba P-202A o B y después de pasar por el intercambiador y enfriador se refluja al tope (plato veintisiete) de la torre para mantener el control térmico de la misma. Todos los productos son extraídos por cajas de extracciones parciales (**producción, 2015**).

1.7. Resultados de estudios anteriores en la refinería de petróleo “Sergio Soto Valdés”

En la refinería “Sergio Soto Valdés” de Cabaiguán se han aplicado varios métodos a las áreas de riesgo, el primero de los trabajos es una investigación realizada en (**León, 2011**), en la misma se realiza un estudio al proceso de Destilación Atmosférica de la propia refinería utilizando los métodos ¿Qué pasa si? y la Lista de comprobación, reportando como resultado que los principales peligros identificados en el proceso de refinación del petróleo, conllevan fundamentalmente, al riesgo de incendio, intoxicación y explosión; dado por las características de peligrosidad de las sustancias y la posibilidad real de fallos en los sistemas automáticos de control (sobrepresión y escape) y por la elevada probabilidad de errores humanos.

El segundo trabajo fue realizado por la misma autora antes mencionada en **(León, 2015)** aplicando el método HAZOP (software Hazopotimizer modificado) y el Índice de DOW respectivamente. Éste permitió evaluar de forma cualitativa los riesgos en las áreas seleccionadas, logrando ordenar o priorizar las acciones preventivas y la asignación de los recursos para minimizar las consecuencias de accidentes probables o la disminución de la probabilidad de ocurrencia de los mismos, definiéndose el AR2 (Destilación Atmosférica) y el AR3 (Destilación al vacío) como las áreas de mayor riesgo en el proceso. El Índice de Incendio y Explosión (IIE) calculado a las áreas de riesgo antes mencionadas, permitió jerarquizar por equipos los riesgos asociados a incendios y explosiones.

Con la obtención de estos resultados se aplica a la refinería en cuestión otro método para dar continuidad a los realizados anteriormente partiendo del método Hazop, del mismo se tomaron las desviaciones, unidades, nodos y causas arrojadas por él, con el objetivo de aplicar el Árbol de Fallos y Errores a las mismas áreas de riesgos.

Se prosigue a aplicar este, pues es un método de gran utilidad en el cual se centra la atención en la identificación y análisis de las condiciones y factores que causan o tienen el potencial de causar o contribuir con la ocurrencia de un evento tope o máximo.

1.8. Método de análisis "Árbol de Fallos y Errores"

El método de análisis de "**Árbol de Fallos y Errores**" (FTA Fault Tree Analysis) permite diferenciar terminológicamente los fallos de los componentes de las instalaciones de los errores en el comportamiento humano **(Trabajo, 1994)**.

En este trabajo se hace referencia a lo expuesto en la **Norma (IEC/FDIS 3101, 2009)**: se trata de un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos. Éste permite identificar y analizar los factores que pueden contribuir al suceso no deseado específico (llamado "evento principal").

1.9. Análisis cualitativo y cuantitativo de los árboles

El análisis cualitativo se realiza para determinar la importancia de los sucesos básicos y de los sucesos capitales con el fin de establecer aceptabilidad, medidas correctoras o la necesidad de estudios más profundos **(Trabajo, 1994)**.

También resalta la importancia de identificar durante el análisis, además de los fallos individuales de los componentes, los posibles fallos debidos a una causa común o la determinación de los componentes que fallan del mismo modo **(Casal.J and Coll.T, 1992);(Trabajo, 1994)**.

Este posibilita conocer y analizar el árbol sobre el plano de su estructura lógica para poder determinar las combinaciones mínimas de sucesos básicos que hagan que se produzca el suceso no deseado o evento que se pretende evitar (noción de "conjunto mínimo de fallos"). Cada uno de los conjuntos mínimos representa una manera distinta de llegar al suceso no deseado. Los métodos cualitativos de análisis de árboles de fallos son básicamente: **(Salvado, 2009)**.

Métodos analíticos: en los cuales el árbol se transforma en una función lógica mediante el álgebra de Boole:

- Cálculo matricial: en el que el árbol se transforma en una matriz, que se manipula con reglas derivadas del álgebra de Boole.

Métodos numéricos: (método de Monte Carlo), sólo utilizados en programas de ordenador.

Métodos de reconocimiento de estructuras: utilizados en programas de ordenador, en los cuales se comparan los árboles con estructuras existentes en bases de datos.

De estos se extraen las siguientes consecuencias:

- Transformar el árbol de fallos en una función lógica.
- La posibilidad de simplificar la función lógica del árbol gracias a la constatación de falsas redundancias. La reducción de falsas redundancias (reducción booleana) consiste en simplificar ciertas expresiones booleanas y consecuentemente los elementos de estructura que las mismas representan **(BOE, 1995)**.

El análisis cuantitativo permite calcular básicamente la frecuencia de acontecimiento de un accidente y la indisponibilidad de aquellos sucesos que en el árbol se representan en un círculo (sucesos básicos) y determinar valores probabilísticos de fallo a aquellos sucesos que se representan en un rombo (sucesos no desarrollados). Para poder efectuar el análisis cuantitativo se precisa conocer el tiempo de funcionamiento de la instalación y las **tasas de fallos**, el tiempo de reparación, la indisponibilidad, y el tiempo de comprobación para cada componente **(Creus.A, 1992)**.

Tasa de fallos o $h(t)$: representa la posibilidad de fallo inmediatamente después del tiempo t dado que en t el componente funcionaba. Así pues, una tasa de fallos elevada indica una alta probabilidad de fallo justo después de dicho instante. Esta tasa se define como:

$f(t)$: función de densidad, **$R(t)$** : función de distribución (**Hernández, 2000**)

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Se pueden diferenciar esencialmente tres tipos de tasas de fallos:

Tasa de fallos constante o cfr (Constant Failure Rate): La probabilidad de fallo instantáneo es siempre la misma. No hay desgaste y no hay defectos ocultos en el componente.

Tasa de fallos creciente o ifr (Increasing Failure Rate): Conforme pasa el tiempo aumenta la probabilidad de fallo. Si hay desgaste del componente.

Tasa de fallos decreciente o dfr (Decreasing Failure Rate): La probabilidad de fallo al principio es alta y va disminuyendo conforme pasa el tiempo. Hay defectos ocultos del componente que salen a la luz en el inicio del uso.

La combinación de estos tres tipos de tasas da lugar a otros modelos más complejos entre los que destaca la curva de la bañera: Tasa de fallos primero decreciente (mortalidad infantil), luego constante (vida útil) y finalmente creciente (desgaste en el componente) (**Rodríguez, 2010**).

Existe información que nos proporciona datos estimativos sobre tasas de errores humanos que permiten asignar valores probabilísticos a su ocurrencia, para lo cual se han desarrollado numerosas técnicas dentro de las cuales podemos mencionar: THERP, TESEO, OATS, HCR y CREAM.

La **THERP** tiene por objetivo: predecir las probabilidades de error humano y evaluar el deterioro de un sistema individuo-máquina causado por los errores humanos (tomados aisladamente o en relación con el funcionamiento de los equipos técnicos), por los procedimientos o las prácticas de ejecución, así como por las otras características del sistema o de la persona que influyen en el comportamiento del mismo, considera a la persona como fuente de fallos y, así, la fiabilidad humana puede evaluarse de la misma manera que la de un dispositivo técnico. Las tareas de la persona se descomponen en actividades elementales de las cuales se puede evaluar la fiabilidad de forma más o menos tradicional, con algunos ajustes ligados a la mayor variabilidad y a la mayor interdependencia de las actividades humanas (**Swain.A.D and Guttman.H.E, 1983**).

La estimación de los efectos del error humano sobre los fallos del sistema implica, generalmente, la integración del análisis de fiabilidad humana en el análisis de probabilidades de riesgos, para así determinar el peso de la "contribución humana" al fallo, y, en definitiva, a la indisponibilidad del sistema o subsistema considerado (**Seguridad, 2009**).

Ventajas y limitaciones de la THERP

Esta técnica de análisis de fiabilidad humana es considerada generalmente como aceptable para diversos campos de actividad pertenecientes a sistemas de alto riesgo (industrias de procesos químicos, de producción de energía nuclear, sectores aeronáutico y aeroespacial, del transporte, electrónico y de la construcción) y puede integrarse en un análisis de probabilidades de riesgos. Además, ha dado lugar al desarrollo de otras técnicas de análisis de fiabilidad humana.

- El desglose de la tarea en acciones elementales, porque ello no siempre es coherente con la organización psicológica de la tarea y se cuestiona además la posible suma o no de las acciones elementales.
- El origen y la aplicabilidad a situaciones diversas de los datos que se dan en las tablas. Los críticos de orientación cognitiva exigen un modo de análisis del error más afianzado teóricamente, más descendiente y se mantienen escépticos sobre la asignación de probabilidades razonables a acciones relacionadas con situaciones muy específicas.
- Por último, algunos analistas podrían tender a considerar los errores de los que se tiene información en la base de datos, ignorando otros errores que pudieran ser también importantes y afectar a la tarea.
- Además, para las tareas de diagnóstico o que requieran un gran nivel de decisión esta técnica no permite identificar recomendaciones exactas para disminuir la probabilidad de fallos humanos de este tipo. Sólo una persona experta en fiabilidad humana puede determinar con precisión las modificaciones ergonómicas necesarias, para tratar sobre las causas psicológicas de algunos errores (**Ferruz.R et al., 1999**).

El **OATS** identifica tres tipos de errores cognitivos:

- error en la percepción de que ocurrió un accidente.
- error al diagnosticar la naturaleza del accidente e identificar las acciones necesarias para remediarlo.
- error en la evaluación temporal y en la implementación de comportamientos correctos.

La estimación de la probabilidad nominal de error está relacionada con el tiempo necesario para tomar una decisión, cuando se detecta una anomalía. Esta vez es igual a:

$$T = t_1 - t_2 - t_3$$

donde **T** es el tiempo de decisión, **t₁** el tiempo transcurrido entre el comienzo del incidente y el final de todas las acciones relacionadas con **t₂**, el tiempo que transcurre entre el inicio del accidente y la planificación mental de la intervención y **t₃**, el tiempo necesario para implementar lo planificado en **t₂** (**Carlizza, 2015**).

El Método de **Confiabilidad Cognitiva Humana (HCR)**: Ha sido desarrollado por *Hannaman, Spurgin y Lukic*, y como parámetro el tiempo disponible es **T**, limitado por aspectos de la percepción cognitiva. En particular, el método da la probabilidad de error **P_e(T)** o probabilidad de no respuesta dentro de **T**, porque la respuesta es más lenta de lo que se requiere. Esta probabilidad no incluye el error de percepción de la anomalía, ni el error de elección de la disposición a tomar. El método se desarrolla de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Clasificación de la tarea.
2. Determinación del valor mediano ($T_{1/2}$)*.
3. Conversión de ($T_{1/2}$)* en ($T_{1/2}$).
4. Determine el tiempo disponible
5. Aplicación del método HCR para obtener **P_e(T)** (**Carlizza, 2015**).

El Método **CREAM** es un modelo cognitivo, es el modelo de control contextual (CoCoM): se basa en la hipótesis de que el comportamiento humano se apoya en la naturaleza cíclica de la cognición humana y la dependencia de los procesos cognitivos deriva del contexto del entorno laboral. Por lo tanto, se toman en consideración las cuatro funciones cognitivas fundamentales del comportamiento humano, y se incluyen los conocimientos y habilidades de una persona. El modelo también utiliza cuatro modelos de control: estratégico, táctico, oportunista e impulsivo: estas son las actitudes del operador, con respecto a su competencia y determinan la secuencia de los procesos cognitivos de las acciones. Es importante tener en cuenta el resultado de una acción o una tarea previa y la noción subjetiva de tiempo disponible. Además, se distinguen en el análisis, las causas, los efectos-manifestaciones y las consecuencias de los errores humanos. Las causas del comportamiento incorrecto, llamados genotipos, son las razones que crean ciertos comportamientos y estos se pueden dividir por causas internas, dependiendo del operador y las causas externas, que dependen del sistema hombre-máquina. Los efectos y

manifestaciones, llamados fenotipos, están representados por formas incorrectas del proceso cognitivo y por expresiones externas verdaderas del comportamiento incorrecto, es decir, por acciones inapropiadas. La distinción entre causas y manifestaciones debe ser respetada en la interacción humano-máquina, para identificar finalmente las causas primarias que dieron origen a los errores humanos (**Carlizza, 2015**).

En este estudio la técnica que se empleará, es el método **TESEO**: se basa en la ponderación de diferentes parámetros que representan los distintos factores que influyen sobre el desarrollo de la actividad (entorno, tipo de actividad, capacidad del operador, etc.). En general se pueden obtener por métodos grupales o por métodos de experto único. En cualquier caso, estos métodos sobre la fiabilidad humana pueden aplicarse de forma cualitativa para conocer los errores humanos dominantes y, por ejemplo, servir de ayuda para la planificación de la formación y los entrenamientos (**Trabajo, 2001**).

Es un modelo extremadamente simple y la probabilidad de falla está dada por el producto de cinco factores que caracterizan los aspectos del sistema (humano, planta, ambiente, etc.). La probabilidad de error viene dada por:

$$P_e = K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5$$

- k_1 es el factor que caracteriza el grado de rutina y si la actividad es habitual para el trabajador, entonces el valor es bajo.
- k_2 es el factor de estrés relacionado con el tiempo necesario para llevar a cabo la actividad (de rutina o no) y en el momento disponible, cuanto más aumenta el estrés, mayor es el coeficiente, porque hay más posibilidad de riesgo.
- k_3 es el factor relacionado con el tipo de operador asignado, su experiencia y el nivel de entrenamiento adquirido, una mayor preparación implica la reducción de este factor.
- k_4 es un factor relacionado con la ansiedad, que depende de la situación laboral, una emergencia efectiva y posibles emergencias.
- k_5 es el factor que tiene en cuenta las condiciones ambientales y la ergonomía de los equipos con los que interactúa el operador. Si el producto $P_e \geq 1$, suponemos que $P_e = 1$ (**Carlizza, 2015**).

1.10. Resolución analítica de los árboles

Para la valoración de la probabilidad global de aparición del "suceso no deseado" se realizan los siguientes pasos:

1. Se asignan valores probabilísticos a los sucesos primarios.
2. Se determinan las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la aparición del "suceso no deseado": establecimiento de los "conjuntos mínimos de fallos".
3. Después de tener los sucesos básicos y las puertas bien definidas mediante la intersección de los conjuntos formamos ecuaciones y sustituimos los sucesos que influyen directamente en las puertas presentes en los árboles.
4. Se transforma el árbol en su expresión lógica y se simplifica mediante el álgebra de Boole. La equivalencia de las puertas lógicas en el álgebra de Boole es:
 - una puerta 0 es equivalente a la unión de conjuntos; signo “+”
 - una puerta Yo INH es equivalente a la intersección de conjuntos; signo “.”
5. Se calcula la probabilidad de cada una de las vías de fallo representada por los conjuntos mínimos de fallos, la cual es igual al producto (intersección lógica en álgebra de Boole) de las probabilidades de los sucesos primarios que la componen. El álgebra de Boole presenta varias propiedades y leyes mediante las cuales se puede realizar la simplificación del árbol, la utilizada en este trabajo es la:

Propiedad distributiva:

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$$

$$x + y \cdot z = (x + y) \cdot (x + z)$$

6. A medida que se desarrolla esta propiedad se va simplificando los miembros que se repiten hasta obtener una ecuación lineal en la cual van a estar presentes los sucesos básicos y la condición que van a dar paso al cálculo de la probabilidad de sucesos básicos y la probabilidad de los conjuntos mínimos de fallo (CMF).
7. Se calcula la "probabilidad de que se produzca el "acontecimiento final" probabilidad de derrame (PD), como la suma de las probabilidades (unión lógica de todos los N conjuntos mínimos de fallo en álgebra de Boole) de los conjuntos mínimos de fallo, como límite superior, ya que matemáticamente debería restarse la intersección de éstos.

8. La probabilidad de derrame va hacer modificada por algunas actuaciones o medidas tomadas, las cuales se calculan mediante el producto de cada actuación presente en los sucesos básicos por el valor de probabilidad dado a cada suceso **(Trabajo, 1994)**.

Resolución matricial de los árboles

Los árboles también se pueden resolver matricialmente, hay que transformarlo en una matriz aplicando las reglas derivadas del álgebra de Boole. Se construye una matriz sustituyendo las puertas lógicas por sus descendientes en forma de filas (puertas 0) o en forma de columnas (puertas Y e INH), y se reduce la matriz con la propiedad de la idempotencia ($x \cdot x = x$, $x + x = x$) y la ley de la absorción ($x \cdot (x + y) = x$, $x + x \cdot y = x$). Cada fila representa un conjunto mínimo de corte. El resultado final es el mismo conjunto mínimo de corte que el encontrado analíticamente **(Casal et al., 2001)**.

Los árboles de fallos son particularmente útiles para identificar las posibles causas y las vías a un fallo (el suceso principal), o para calcular la probabilidad del suceso principal, dado el conocimiento de las probabilidades de los eventos causales. Los beneficios de los mismos son muy importantes cuando son utilizados en la etapa de diseño de un sistema para identificar las posibles causas de fallo y, por lo tanto, para elegir entre diferentes opciones de diseño. Se puede utilizar en la fase de funcionamiento para identificar cómo pueden ocurrir fallos importantes y la importancia relativa de las diferentes vías para el suceso principal. Un árbol de fallo también puede ser usado para analizar un fallo que se ha producido para mostrar esquemáticamente cómo sucesos diferentes se unieron para causar el fallo **(Figallo, 2012)**.

1.11. Ventajas y desventajas de los “Árboles de Fallos y Errores”

- Método de análisis sistemático y robusto de representación gráfica, que facilita la comprensión de la causalidad.
- El enfoque “top-down” y la representación gráfica permite el entendimiento del comportamiento del sistema bajo análisis.

Por otra parte, podemos mencionar dentro de las desventajas las siguientes:

- Requiere de una elevada formación técnica, junto con un conocimiento detallado del sistema o proceso y de sus modos de fallos.
- La mayoría de árboles son tan complejos que se requieren softwares para calcular la probabilidad de los “top event”. Si no hay una buena base de datos de probabilidades de los eventos básicos, la incertidumbre crece en este cálculo.

- No es dinámico, sólo incluye estados binarios (falla o no) **(Walls, 2003)**.

Los resultados de los análisis del árbol de fallos son los siguientes:

- Combinación de fallos primarios que pueden producir el accidente estudiado.
- Una representación gráfica de cómo puede ocurrir el suceso principal, que muestra las vías que interactúan donde se producen dos o más sucesos.
- Una lista de conjuntos de cortes mínimos (vías individuales de fallo) con (donde se dispone de datos) la probabilidad de que ocurra cada uno.
- Análisis de un fallo que se ha producido para mostrar esquemáticamente cómo sucesos diferentes se unieron para causar el fallo.
- El resultado cuantitativo permite calcular básicamente la frecuencia de acontecimiento de un accidente y la indisponibilidad del sistema **(Hutte.H, 1968)**.

1.12. Conclusiones parciales

1. La gran importancia que tiene la *búsqueda de nuevos métodos* para la evaluación probabilística del riesgo de accidente mayor se debe básicamente a dos razones; a las nuevas legislaciones nacionales e internacionales que exigen la aplicación de métodos análisis de riesgo más eficaces y a que los métodos existentes, aunque son herramientas importantes de prevención del riesgo de accidentes mayores, son muy complejos en su implementación práctica.
2. El Árbol de Fallos y Errores (AFE), es la *herramienta más común* en el de Análisis Probabilístico de Seguridad (APS), su gran utilización se basa en que puede proporcionar resultados tanto cualitativos, mediante la búsqueda de combinaciones que llevan a la falla del sistema, como cuantitativos en términos de las probabilidades de falla de los componentes y los errores de operación que pueden provocar un accidente mayor.
3. La legislación cubana considera que las refinerías de petróleo como instalaciones de peligro mayor, *deben ser objeto de estudio* para la evaluación de la seguridad en sus procesos tecnológicos, no sólo por el interés científico indiscutible que despierta la complejidad e incertidumbre en el análisis de los riesgos de accidentes tecnológicos graves, sino también por las exigencias.

Capítulo 2. Metodología del AFE para el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la industria química.

Este capítulo tiene el objetivo de fundamentar una propuesta metodológica con inclusión de nuevos métodos y procedimientos que permitan análisis probabilístico del riesgo de accidente mayor de forma integral, considerando el Árbol de Fallos y Errores como base de la estructura analítica de la metodología.

La *propuesta metodológica* con la adecuación de los procedimientos del Árbol de Fallos y Errores (AFE) para el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la industria química, se define en las siguientes etapas:

- Etapas 1.* Definición del problema y establecimiento de condiciones límite.
- Etapas 2.* Determinación del daño o condición no deseada a evitar o mitigar, Suceso no deseado o Evento tope (TOP).
- Etapas 3.* Identificación de causas, Sucesos básicos o Eventos iniciadores (SB), que pueden provocar el Suceso no deseado o Evento tope (TOP).
- Etapas 4.* Estimación de la probabilidad o frecuencia esperada para los Sucesos básicos o Eventos iniciadores (SB).
- Etapas 5.* Identificación de la combinación de fallos, errores o condiciones que puedan conducir al daño, Sucesos Intermedios (SI) y Secuencias.
- Etapas 6.* Definición del alcance, resolución y reglas generales del Árbol de Fallos y Errores" (AFE).
- Etapas 7.* Construcción del Árbol de Fallos y Errores (AFE).
- Etapas 8.* Obtención de los Conjuntos Mínimos de Fallos (CMF).
- Etapas 9.* Cálculo de la probabilidad de ocurrencia del Suceso no deseado o Evento tope (TOP).
- Etapas 10.* Evaluación de las medidas de importancia de los Sucesos básicos o Eventos iniciadores (SB).
- Etapas 11.* Evaluación de las actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos o Eventos iniciadores (SB).
- Etapas 12.* Representación gráfica y análisis de los resultados de la aplicación de la metodología.

A continuación, se explican las etapas de la metodología AFE, siguiendo la estructura lógica definida en la *Figura 2.1* con el fin de facilitar su comprensión.

Como paso previo, se deben seleccionar los datos de los resultados del análisis, en el caso de estudio en cuestión, de identificación y evaluación cualitativa de riesgos en los procesos químicos, para lo cual el procedimiento más utilizado es el *Hazop (Análisis Funcional de Operabilidad)*.

2.1. Definición del problema y establecimiento de condiciones límite

A partir de los datos seleccionados, la *definición del problema* debe tomar como referencia aquellas desviaciones o escenarios de riesgo más probables y con mayores consecuencias estimadas, en caso de ocurrir (mayor riesgo).

Asimismo, las *condiciones límites* se refiriere a la selección de las áreas de riesgo, dentro de la instalación en estudio, que deben ser analizadas con mayor profundidad por su significación en los accidentes mayores más probables, teniendo en cuenta que la técnica de AFE es muy trabajosa y su análisis probabilístico es un procedimiento complejo.

Como paso previo, se deben seleccionar los datos de los resultados del análisis, en el caso de estudio en cuestión, de identificación y evaluación cualitativa de riesgos en los procesos químicos, para lo cual el procedimiento más utilizado es el *Hazop*.

2.2. Definición del problema y establecimiento de condiciones límite

A partir de los datos seleccionados, la *definición del problema* debe tomar como referencia aquellas desviaciones o escenarios de riesgo más probables y con mayores consecuencias estimadas, en caso de ocurrir (mayor riesgo).

Asimismo, las *condiciones límites* se refiriere a la selección de las áreas de riesgo, dentro de la instalación en estudio, que deben ser analizadas con mayor profundidad por su significación en los accidentes mayores más probables, teniendo en cuenta que la técnica de AFE es muy trabajosa y su análisis probabilístico es un procedimiento complejo.

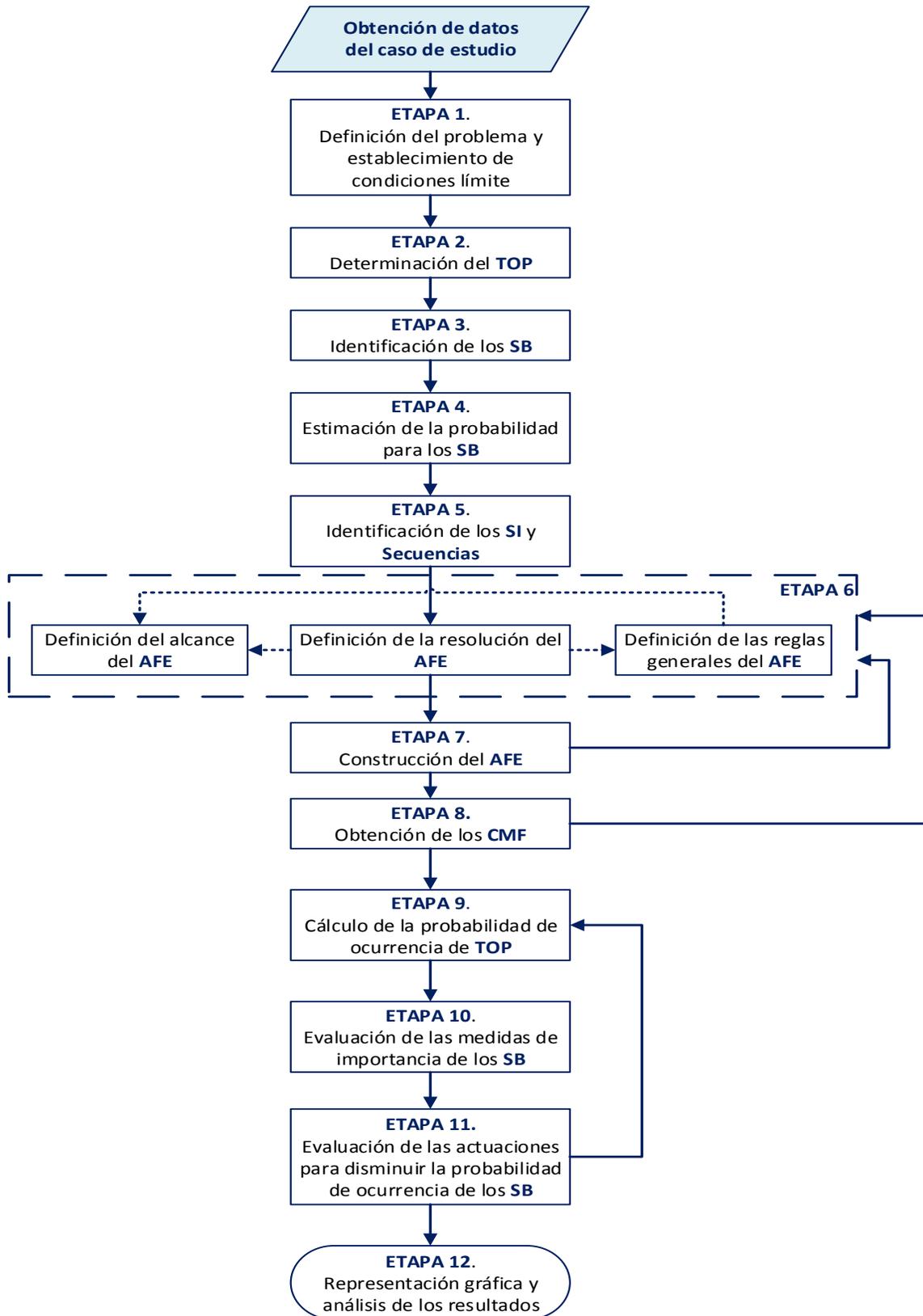


Figura 2.1. Metodológica del AFE para el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la industria química.

2.3. Determinación del daño o condición no deseada a evitar o mitigar, Suceso no deseado

De los escenarios de riesgo definidos en la etapa anterior, se determina la condición o daño que se analizará con la técnica AFE, el evento no deseado que se pretende analizar con esta técnica puede corresponder directamente con un suceso iniciador de un accidente, puede formar parte de una secuencia de accidente, o puede representar a parte o todo un sistema dispuesto para llevar a cabo una función, como es el caso de este trabajo, la *seguridad en la industria química*, el Suceso no deseado, está referido al incendio, explosión, derrame o fuga de sustancias peligrosas, accidentes mayores más probables en la industria química.

En la *Tabla 2.1* se representa un *ejemplo* para la definición de las causas o sucesos y las acciones o medidas de seguridad que pueden asumirse en la instalación, a partir de un análisis Hazop previo.

Tabla 2.1. Ejemplo de Análisis Hazop, para la selección de datos.

No.	Desviación	Causas	Efectos/ Consecuencias	Salvaguardas/ Sistema de protección	Recomendaciones/ Actuación
281	Aumento de presión del crudo en la zona de convección del horno F-101. (Nodo 14)	<ul style="list-style-type: none"> • Obstrucciones en la línea a F-101 y en los tubos de las secciones, por mala calidad de la materia. • Fallo de la bomba P-105 A/B. • Tupiciones en el banco de intercambiadores de ca • Rotura de las válvu • Error del operador. 	<p>Derrame de combustible</p> <p>....</p> <p>Incendio del combustible</p>	<p>Manómetros</p> <p>Termopares ...</p> <p>Alarma sonora y lumínica.</p> <p>Multipunto para control.... visual</p> <p>..</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento a la materia prima. • Revisión y mantenimiento planificado. • Parada de emergencia de F-101. • Instalar termodiales e indicadores de flujo en la entrada y salida del horno. • Capacitación y evaluación del operador.

2.4. Identificación de causas, Sucesos básicos (SB), que pueden provocar el Suceso no deseado

Esta etapa consiste en identificar todas las causas raíces que pueden llevar a desencadenar un accidente mayor (Suceso no deseado). Este paso es fundamental en el éxito del análisis por AFE, por lo que debe realizarse, por parte del equipo de trabajo especializado, una evaluación bien detallada de todas las causas que intervienen en la secuencia o combinación de fallos y errores.

Los SB se pueden identificar de diferentes fuentes: se debe considerar la experiencia operacional de los especialistas de la industria en cuestión, las causas raíces de accidentes ocurridos en otras plantas similares, inclusive podría ser desde la experiencia de los trabajadores de la planta.

Aunque, los SB pueden estar identificados, en alguna medida, a partir del estudio *Hazop* (Tabla 2.1), en muchas ocasiones este análisis no llega a las causas elementales o raíces, quedando en las causas inmediatas o Sucesos Intermedios (SI), por lo que es recomendable profundizar en el estudio, dado el caso.

2.5. Estimación de la probabilidad o frecuencia esperada para los Sucesos básicos (SB)

Según el modo en que ha fallado el componente o equipo, se calcula la probabilidad de fallo del mismo en función de la tasa de fallos que se puede obtener en bancos de datos y, fundamentalmente, de la propia experiencia de la industria, a partir de los datos históricos de los trabajos de mantenimiento y reparación.

Tasa de fallos (λ): Está determinada por el número de fallos que ocurren en un equipo dividido por el tiempo transcurrido.

Durante la realización del AFE se puede distinguir entre dos tipos principales de fallos:

Fallo en operación. El equipo o componente del que se estudia el fallo se encuentra permanentemente en operación, de tal forma que su fallo es inmediatamente percibido. Una vez se detecta el fallo, el equipo o componente se repara o sustituye también inmediatamente. La probabilidad de fallo de un componente con frecuencia de fallo λ durante un tiempo de operación T es: $P_F = 1 - \exp(-\lambda T)$

Cuando el producto λT es significativamente menor que la unidad (**1**), lo cual es bastante común, ya que las frecuencias de fallo generalmente son bajas, la probabilidad de fallo en operación puede aproximarse mediante: $P_F \approx \lambda T$

Fallo en demanda. Es característico de un equipo o componente del que no se conoce cuál es su estado (operativo o no), durante la operación normal de la planta. Este estado únicamente se conoce cuando se “demanda” su operación o bien durante una prueba. Un resultado negativo de la prueba (componente en estado no operativo) comporta su sustitución o reparación inmediata.

La probabilidad de fallo *en demanda* de un componente con frecuencia de fallo λ con un intervalo entre pruebas T es: $P_F = \frac{\lambda T - 1 + \exp(-\lambda T)}{\lambda T}$

Obviamente, ambos tipos de fallos constituyen una simplificación de la realidad, que obvian cuestiones tales como la posibilidad de un estado de funcionamiento parcial, o bien el tiempo de reparación. Estos factores pueden tenerse en cuenta mediante otro tipo de técnicas, tales como los diagramas de *Markov*.

Existe, asimismo, información que proporciona datos estimados sobre tasas de errores humanos, a utilizar en el análisis del AFE, que permite asignar valores probabilísticos a su ocurrencia, para lo cual se han desarrollado numerosas técnicas.

En este caso se recomienda utilizar el *Método TESEO*, resumen en la *Tabla 2.2*, de estimación de errores humanos, donde la probabilidad del error se calcula como el *producto de K1 a K5*. En el segundo caso, a partir de posibles acciones del operador se le asignan, directamente, valores de probabilidad de error.

Tabla 2.2. Resumen del Método TESEO de estimación de errores humanos.

Tipo de actividad	K1
Rutinaria, simple	0,001
Rutinaria, requiere atención	0,01
No rutinaria	0,1
Factor de estrés temporal (tareas rutinarias)	K2
Tiempo disponible: 2 segundos	10
Tiempo disponible: 10 segundos	1
Tiempo disponible: 20 segundos	0,5
Factor de estrés temporal (tareas no rutinarias)	K2
Tiempo disponible: 3 segundos	10
Tiempo disponible: 30 segundos	1
Tiempo disponible: 45 segundos	0,3
Tiempo disponible: 60 segundos	0,1
Características del operador	K3
Bien seleccionado y adiestrado, experto	0,5
Conocimientos y adiestramiento promedios	1
Escaso conocimiento, adiestrado deficiente	3
Factor de ansiedad en la actividad realizada	K4
Situación grave, emergencia	3
Situación de emergencia potencial	2
Situación normal	1

Factor ergonómico en la actividad realizada	K5
Microclima excelente, muy buena interface con la planta	0,7
Buen microclima, buena interface con la planta	1
Microclima aceptable, interface con la planta aceptable	3
Microclima aceptable, interface con la planta deficiente	7
Microclima en malas condiciones, interface con la planta deficiente	10

Acción del operador	Probabilidad
No observa el indicador, o lo observa pero no emprende ninguna acción, aunque debería hacerlo.	0,04
No percibe la alarma, o la percibe pero no emprende ninguna acción, aunque debería hacerlo.	0,03
No bloquea la tubería, como estaba previsto en una parada planificada.	0,001
No bloquea la tubería, como estaba previsto en una parada de emergencia.	0,005
Se equivoca al accionar las válvulas cuando se intercambia un conjunto de dos bombas (se para la que está funcionando y se arranca la que estaba en espera)	0,0025
Para manualmente una bomba sin tomar acciones para bloquear la tubería.	0,01
Error general de comisión (por ejemplo leer equivocadamente un rótulo y como consecuencia seleccionar el interruptor equivocado).	0,003
Error general de omisión cuando no existe indicación en el cuarto de control del estado del elemento afectado (<i>por ejemplo</i> olvidar poner otra vez una válvula en la configuración apropiada después de haber realizado trabajos de mantenimiento).	0,01
Error general de omisión cuando el paso omitido está incluido dentro de un procedimiento en lugar de al final, como ocurría en el caso anterior.	0,003
Errores de operaciones aritméticas simples, realizadas manualmente y comprobadas rutinariamente, sin repetir el cálculo en otro papel.	0,03
No toma la decisión correcta, durante los primeros 60 segundos en una situación de muy alto estrés.	Aprox.=1,0
No toma la decisión correcta, durante los primeros 5 minutos en una situación de muy alto estrés.	0,9
No toma la decisión correcta, durante los primeros 30 minutos en una situación de muy alto estrés.	0,1

2.6. Identificación de la combinación de fallos, errores o condiciones que puedan conducir al daño, Sucesos Intermedios (SI) y Secuencias.

El proceso de identificación de las causas o condiciones que puedan conducir al daño, Suceso TOP, se realiza de arriba hacia abajo, paso a paso, identificándose los SI, resultante de sucesos más elementales, es decir, dependen a su vez de otras causas o SB, de esa forma hasta llegar a las causas raíces y a todas las secuencias del AFE.

En esta fase se integran todos los conocimientos sobre el funcionamiento y operación de la instalación con respecto del Suceso TOP estudiado. Es importante la identificación de la combinación de fallos y errores, y las secuencias a fin de agrupar por ramas el futuro AFE, que de otra forma puede resultar extremadamente complejo para su construcción y posterior análisis probabilístico. En la práctica los eventos catastróficos son el resultado de combinaciones de múltiples causas, lo que se trata de representar por los SI en determinadas secuencias.

2.7. Definición del alcance, resolución y reglas generales del Árbol de Fallos y Errores

Aunque esta etapa pudiera considerarse como parte de la construcción del AFE, en este caso se consideró oportuno definirla como paso previo a la representación gráfica del AFE, etapa siguiente, considerada de forma independiente. En la práctica, ambas etapas (6 y 7) se ejecutan de forma paralela e interactiva, como se representa en la *Figura 2.1*.

El *alcance* del AFE a desarrollar está definido en función de la complejidad de la instalación en estudio y de los accidentes mayores probables identificados en dicha instalación.

En este sentido, el AFE podrá construirse para uno o varios accidentes mayores (incendio, explosión, derrame o fuga de sustancias peligrosas), y para toda la instalación, para una o varias áreas de riesgo o para un equipo en concreto. De esta forma, la cantidad de AFE que se construyan para una instalación estará en función del *alcance* que se le asigne a cada uno de ellos.

Asimismo, la *resolución* y *reglas generales*, que se deseen establecer para el desarrollo del AFE, darán la medida de complejidad en la construcción y análisis probabilístico del AFE. En este caso, la *resolución* del AFE se refiere al nivel de detalles que se pretende dar en la definición de las secuencias de sucesos que lo conforman, el nivel de *resolución* estará limitado por los objetivos del estudio que se realiza, los datos disponibles, la preparación del equipo de trabajo y el tiempo disponible para el estudio.

Las *reglas generales*, son los compromisos previos o condiciones para el diseño del AFE, que deben establecerse entre el equipo de trabajo y el cliente, para que el AFE resultante quede balanceado en todas sus ramas y pueda a su vez ser comparado con otros AFE que se construyan para la misma instalación.

2.8. Construcción del Árbol de Fallos y Errores (AFE)

La ventaja principal de la técnica AFE es su representación gráfica, que facilita la comprensión de las causas que provocan un accidente mayor; un AFE, como tal, es un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos y errores parciales que conducen al Suceso TOP. La relación lógica entre los sucesos es representada secuencialmente por los operadores lógicos **Y**, **O**, **INH** (el operador condicional) utilizados en álgebra booleana.

Prefijado el Suceso TOP en el sistema a analizar, se procede descendiendo escalón a escalón a través de los SI hasta alcanzar los SB y a los Sucesos no desarrollados (SND) que generan las situaciones que, concatenadas, contribuyen a la aparición del Suceso TOP.

La *Etapa 7*, de construcción del AFE, debe ser interactiva con la etapa anterior (*Etapa 6*), donde se define el alcance, la resolución y las reglas del AFE, en la *Figura 2.1* se representa como un lazo de retroceso interactivo que significa que durante la construcción del AFE es necesario ir ajustando, de forma paralela, los elementos de la *Etapa 6*, hasta lograr la uniformidad en la representación secuencial lógica que se pretende.

Para la representación gráfica de los AFE en este trabajo se han tomado un grupo de símbolos de representación universal normalizada (aparecen en diferentes fuentes bibliográficas) y se le han personalizado, con ayuda del *software Visio profesional 2016*, adecuando su utilización a las características de la estructura metodológica que se propone en este estudio.

En la *Tabla 2.3* se relacionan los símbolos utilizados en el AFE de esta metodología.

En la *Figura 2.2* se representa un *ejemplo* de representación gráfica de AFE, utilizando la simbología de la *Tabla 2.3*.

Tabla 2.3. Símbolos utilizados en el Árbol de Fallos y Errores de esta metodología.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	PUERTA LÓGICA "Y" equivale a un signo "." equivalente a la intersección. El suceso de salida se cumple solamente si ocurren todos los sucesos de entrada.
	PUERTA LÓGICA "O" equivale a un signo "+", no de adición sino de unión en teoría de conjuntos. El suceso de salida se cumple si ocurre cualquiera (al menos uno) de los sucesos de entrada.
	PUERTA LÓGICA "INH". Al igual que la puerta "Y" equivale a un signo "." equivalente a la intersección. El suceso de salida ocurre solamente si se dan los sucesos de entrada y se cumple la condición.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas.
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo.
	SUCESO NO DESEADO. Es el suceso del que parte el árbol para su análisis.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No se puede considerar como BÁSICO, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por poco interés.
	ACTUACIÓN DE SEGURIDAD. Influye en la probabilidad de ocurrencia del SUCESO BÁSICO.
	TRANSFERENCIA. Indica que el ÁRBOL continúa en otro lugar.

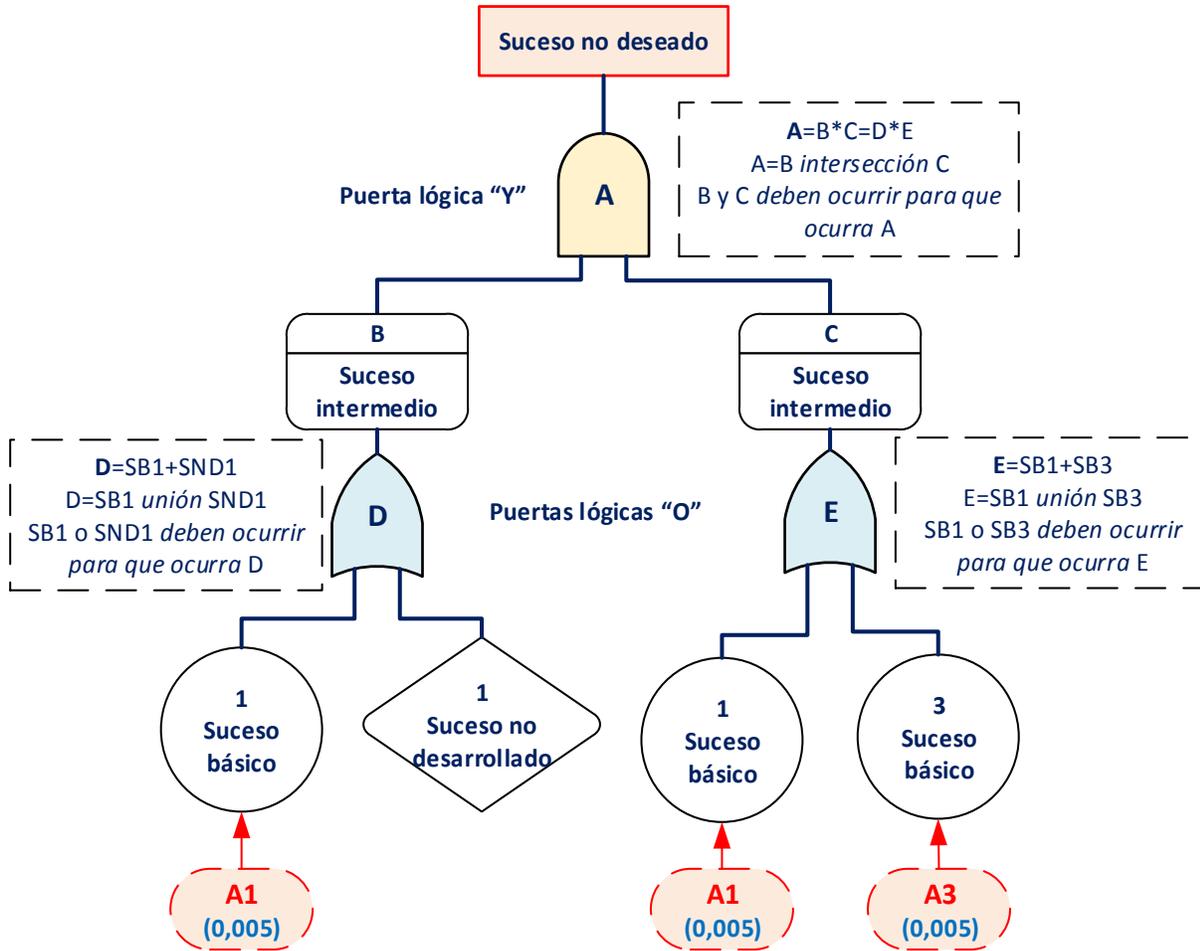


Figura 2.2. Ejemplo de representación gráfica de un Árbol de Fallos y Errores.

2.9. Obtención de los Conjuntos Mínimos de Fallos (CMF)

En esta etapa se reduce la lógica del árbol hasta obtener las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la ocurrencia del propio Suceso TOP. Cada una de estas combinaciones, llamadas Conjuntos Mínimos de Fallos (CMF), corresponde a la intersección lógica de varios sucesos elementales.

En el procedimiento de obtención de los CMF se aplican las leyes y propiedades básicas del álgebra de Boole:

Propiedad conmutativa:

$$x + y = y + x$$

$$x \cdot y = y \cdot x$$

Propiedad asociativa:

$$x + (y + z) = (x + y) + z$$

$$x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$$

Propiedad distributiva:

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$$

$$x + y \cdot z = (x + y) \cdot (x + z)$$

$$x \cdot x = x$$

$$x + x = x$$

Ley de absorción:

$$x \cdot (x + y) = x$$

Propiedad idempotente:

$$x + x \cdot y = x$$

Como por hipótesis del AFE, se supone que los sucesos básicos son mutuamente independientes (es decir, que la ocurrencia de uno de ellos no tiene influencia sobre la ocurrencia de otro), la probabilidad de un Conjunto Mínimo de Fallos (P_{CMF}) viene dada por el producto de las probabilidades de los Sucesos básicos o Eventos iniciadores (P_{SB}) que lo componen «Teorema de las probabilidades compuestas».

Existen dos formas clásicas para obtener los CMF: elaborando una matriz (*Tabla 2.4*) por niveles del AFE, sustituyendo las puertas "O" por sus entradas en las filas de la matriz y las puertas "Y" en columnas, y la otra, el método analítico a partir de las ecuaciones que se generan en cada uno de los niveles del AFE, en correspondencia con las intersecciones lógicas.

Se trata de ir descendiendo en el AFE para su resolución eliminando y sustituyendo los sucesivos símbolos de identificación de las puertas hasta obtener las diferentes combinaciones de fallos primarios identificados, SB.

En las dos variantes, se aplican las leyes y propiedades básicas del *álgebra de Boole*, lo que permite simplificar la función lógica del AFE eliminando las falsas redundancias.

Tabla 2.4. Ejemplo de Matriz para obtener el CMF del AFE de la Figura 2.2.

Puerta "Y"	Puertas "O"	
A	D	E
D	SB1	SB1
E	SND1	SB3
A=D*E	D=SB1+SND2	E=SB1+SB3

Al repetirse el *suceso básico* "SB1" se simplifica la redundancia, quedando como ecuación general del AFE: $A = (SB1 + SND1) \cdot SB1 + SB3 = SB1 \cdot SB3$, en este caso, el Suceso no desarrollado (SND1) no se considera por desconocer su probabilidad de ocurrencia. Quedando, un CMF: $P(1,3) = P1P3$, donde P es la probabilidad del SB en cuestión.

En este *ejemplo sencillo* se vincula la matriz y el método analítico a partir de las ecuaciones, en casos complejos, se puede utilizar indistintamente una u otra variante para la obtención de los CMF.

Con el listado de los diferentes CMF, se tiene una clasificación de los caminos o combinaciones de sucesos que pueden producir el Suceso TOP.

Si lo que se pretende es hacer una clasificación por importancia o magnitud (de más a menos importancia) se debe asignar valores a cada SB, realizando un análisis cuantitativo para determinar las probabilidades.

Esta etapa de obtención de los CMF es interactiva con la *etapa 6*, como está representado en la *Figura 2.1*, fundamentado en que en la medida de que se obtengan los CMF y consecuentemente, se logre la simplificación de la solución analítica del AFE inicial, se podrá replantear el *alcance*, la *resolución* y las *reglas generales*, definidas en primera instancia y modificar la estructura gráfica del AFE que se construye.

2.10. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia del Suceso no deseado

La probabilidad total del Suceso TOP (P_{TOP}) es la suma de las probabilidades de los CMF (P_{CMF}), como límite superior. La probabilidad de un CMF (P_{CMF}) es el producto de las probabilidades de sus SB (P_{SB}).

Tabla 2.5. Ejemplo de tabla de cálculo de la probabilidad total del Suceso TOP (P_{TOP}).

Sucesos Básicos	P_{SB}	CMF	P_{CMF}	P_{TOP}
SB1	P_{SB1}			$P_{TOP} = P_{CMF1} + P_{CMF2} + P_{CMF3}$
SB3	P_{SB3}	1,3	$P_{CMF1} = P_{SB1} * P_{SB3}$	
SB4	P_{SB4}	1,4	$P_{CMF2} = P_{SB1} * P_{SB4}$	
SB5	P_{SB5}	1,5	$P_{CMF3} = P_{SB1} * P_{SB5}$	

2.11. Evaluación de las medidas de importancia de los Sucesos básicos (SB)

La importancia de los SB en el AFE puede calcularse a través de diferentes medidas existentes, que permiten el análisis desde diferentes puntos de vista. En este caso se han considerado tres de las medidas más utilizadas.

Importancia por contribución o Fussell-Vesely (IFV): Se define IFV de un SB como la probabilidad de contribución al Suceso TOP, en caso de producirse éste. Se calcula mediante:

$$IFV_i = \frac{\sum P_{CMFi}}{P_C}, \quad \text{donde:}$$

IFV_i es la importancia del SB (SB_i),

P_C es la probabilidad del Suceso TOP,

P_{CMFi} es la probabilidad de los CMF donde interviene el SB.

La sumatoria se extiende a todos los CMF del AFE.

La importancia IFV de un SB es un número comprendido entre 0 y 1 (es una probabilidad). Cuanto mayor es la importancia, más probable es que el Suceso TOP se produzca a consecuencia del SB en cuestión (sólo o acompañado por otros).

En el extremo, si la IFV de un suceso es 1, esto significa que el Suceso TOP no puede producirse si no se produce el SB. Si la IFV de un suceso es 0, esto significa que este suceso es irrelevante respecto a la ocurrencia del Suceso TOP.

Características de IFV:

- Identifica la importancia del valor probabilístico.
- Es la fracción de la frecuencia de P_c en la que participa el SB.
- Adecuada para jerarquizar.
- No toma en cuenta consecuencias.
- No indica el nivel de riesgo existente.

Incremento en riesgo o Risk Achievement Worth (RAW): El RAW de un SB es una medida de cuál sería la probabilidad del Suceso TOP, si el SB en cuestión ya se hubiera producido; es decir, si su probabilidad fuese uno (1) en lugar del valor que corresponda. Se calcula mediante:

$$RAW_i = 1 + IFV_i \left(\frac{1}{P_{SBi}} - 1 \right), \quad \text{donde:}$$

P_{SBi} es la probabilidad del SB (SB_i).

El RAW de un SB es un valor mayor o igual que uno, que constituye una medida del *perjuicio* que podría causar a la fiabilidad y/o seguridad de un sistema si ocurre el SB. Es útil, por tanto, para gestionar estrategias de seguridad y de mantenimiento.

En el extremo, si el RAW de un SB es igual a uno, esto significa que no se producirá alteración alguna de la probabilidad del Suceso TOP, aunque el SB en cuestión se produzca.

En el otro extremo, si el RAW de un SB es muy grande, esto significa que, si se produce este SB, es casi inevitable el Suceso TOP.

Características de RAW:

- Proporciona la degradación del sistema en caso de ocurrir el SB.

- No considera explícitamente los valores reales de las indisponibilidades de los eventos.
- Aplicable únicamente si un solo componente o equipo está fallando.
- Su valor es grande para componentes confiables.

Reducción de riesgo o Risk Reduction Worth (RRW): El RRW de un SB es una medida de cuál sería la probabilidad del Suceso TOP si el SB en cuestión no se produjera nunca; es decir, si su probabilidad fuese cero (0) en lugar del valor que corresponda. Se calcula mediante:

$$RRW_i = \frac{1}{1 - IFV_i}$$

El RRW de un SB es un valor mayor o igual que uno, que constituye una medida del *beneficio* que podría causar a la fiabilidad y/o seguridad de un sistema si se mejora o evita el SB. Es útil, por tanto, para decidir estrategias de seguridad y/o diseño o sustitución de equipos o componentes con fallas frecuentes, por otros más fiables.

En el extremo, si el RRW de un SB es igual a uno, esto significa que no se producirá alteración alguna de la probabilidad del Suceso TOP, aunque el SB en cuestión se produzca.

En el otro extremo, si el RRW de un SB es muy grande, esto significa que, si se impide este SB, es poco probable que se produzca el Suceso TOP.

Características de RRW:

- Esta medida proporciona los eventos básicos que más contribuyen al riesgo.
- Identifica aquellos SB que, si fueran perfectamente confiables, con indisponibilidad nula, conducirían a una reducción más importante del riesgo del sistema.

2.12. Evaluación de las actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos (SB)

Esta etapa es una modificación que se recomienda al análisis de riesgo clásico, utilizando el AFE, complementado con la evaluación de las medidas de importancia (*etapa 10*). En la *Figura 2.1* se representa como un lazo de retroceso interactivo con la *etapa 9*, cálculos de la probabilidad de ocurrencia de los SI y Suceso TOP, este procedimiento es un método de mejoramiento continuo (dinámico) de la seguridad industrial en las instalaciones estudiadas.

Sobre la base del estudio de los resultados de evaluación del AFE se proponen las mejoras que van encaminadas a reducir la probabilidad de los sucesos que, a través del estudio de importancia, han resultado tener mayor significación.

Las actuaciones o medidas que se tomen deberán evaluarse, considerando el impacto de mejoramiento esperado en valores porcentuales sobre la causa raíz o suceso básico a que está dirigida la influencia de la acción o medida.

Una actuación o medida de seguridad debe influir en al menos un SB y puede influir sobre varios SB. Asimismo, un SB puede estar influenciado por una, varias o ninguna medida o actuación de seguridad.

2.13. Representación gráfica y análisis de los resultados

En esta etapa se resumen los resultados alcanzados en la aplicación de la metodología de análisis de riesgo propuesta, haciendo énfasis en la *probabilidad* global de aparición del "suceso no deseado" o "evento que se pretende evitar" y las *vías de fallo más críticas*, es decir, las más probables entre las combinaciones de sucesos susceptibles de ocasionar el "suceso no deseado". Además, en esta etapa, se analizan los resultados de la medida de importancia *Birnbaum (B)*.

La medida de importancia Birnbaum (B) para un componente o equipo es independiente de su propia fiabilidad y solamente depende de la estructura del sistema. Es decir, esta medida evalúa la importancia del *perjuicio* que la posición, que ocupa el componente dentro del sistema, proceso o instalación, podría causar a la fiabilidad y/o seguridad de la instalación.

$$B_i = (RAW_i - 1)P_C$$

En todos los casos, la *representación gráfica* de los resultados utilizando el *Microsoft Excel*, facilita en gran medida el análisis de resultados referido.

2.14. Conclusiones parciales

1. La *metodología propuesta* define las etapas y procedimientos necesarios para el análisis de riesgo a partir de acontecimientos finales muy graves (incendio, explosión, derrame o fuga de sustancias peligrosas), sucesos no deseados, probables en la industria química, que se tratan de evitar o mitigar sus consecuencias.
2. En la *propuesta metodológica*, los métodos del análisis estructural y probabilístico del AFE han sido simplificados y adecuados a los accidentes mayores más probables en la industria química, facilitando la determinación del riesgo individual en escenarios probables de accidente mayor, donde se conjuguen diversos fallos y errores.

Capítulo 3. Aplicación de la Metodológica del AFE en el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor en la Refinería “Sergio Soto Valdés”

Este capítulo tiene como principal objetivo, validar la Metodología, propuesta en el Capítulo 2 de este trabajo, aplicando sus procedimientos en el análisis probabilístico del riesgo tecnológico de accidente mayor a los principales equipos y procesos del área de producción de la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán.

Los datos a utilizar en este caso de estudio fueron seleccionados de los resultados del análisis de identificación y evaluación cualitativa de riesgos, obtenidos en investigaciones previas en la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán, mediante el método *Hazop (Análisis Funcional de Operabilidad)*.

3.1. Definición del problema y establecimiento de condiciones límite.

Definición del problema: en las *Tablas 3.1; 3.2; 3.3 y 3.4*, se resumen los datos de los accidentes mayores a analizar. Como se puede observar en las referidas *tablas de datos*, estos factores de riesgo (desviaciones) se consideran probables y con las mayores consecuencias estimadas.

Condiciones límites: este estudio se limita a los cuatro equipos principales, de dos áreas de riesgo del proceso de refinación de petróleo, los que se proponen para ser analizados a profundidad por su significación como accidentes mayores más probables. Las 15 desviaciones seleccionadas corresponden a los hornos (F-101 y F-102) y las torres (T-101 y T-102) del proceso de refinación atmosférica y al vacío de la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán.

La selección de las desviaciones a evaluar, se fundamenta en los *niveles de riesgo* definidos en el estudio de referencia, tomado como fuente de datos. La definición de los *niveles de riesgo* se basa en las consecuencias probables, grado de seguridad y urgencia de la actuación ante este tipo de evento. En todos los factores de riesgo seleccionados, como se observa en el Anexo 3.1. Tablas 3.1; 3.2; 3.3 y 3.4: las consecuencias son *inadmisible*s o *importantes*; la seguridad se considera *aceptable* teniendo en cuenta los Sistemas de protección disponibles en la instalación, y la actuación que se recomienda, como medida, es *inmediata* o *a corto plazo*, en correspondencia con las consecuencias probables.

3.2. Determinación del daño o condición no deseada a evitar o mitigar, Suceso TOP

De los factores de riesgo definidos en la etapa anterior (*Tablas 3.1; 3.2; 3.3 y 3.4*), se determinó que, en todos los casos, los Sucesos TOP que se evaluarán con la metodología propuesta en este trabajo son: el **derrame de combustible**, suceso precursor de un accidente mayor en todos los escenarios y el **incendio**, que forma parte de la secuencia de accidente.

El escenario que se asume como más probable, supone que una vez que ocurra el **derrame de combustible** provocado por las desviaciones del proceso, y en presencia de una **fuentes de ignición** (también es Suceso TOP), es probable el **incendio** del combustible. Estos dos tipos de accidentes mayores y la secuencia del escenario supuesto, son los eventos más probables en este tipo de instalación.

3.3. Identificación de causas, SB, que pueden provocar el Suceso TOP

Los SB se identificaron tomando como base el estudio *Hazop* de referencia (*Tablas 3.1; 3.2; 3.3 y 3.4*). No obstante, fue necesario, además, consultar a varios especialistas de la instalación y operadores de las áreas en estudio, para determinar, con mayor certeza, las causas raíces de los accidentes mayores probables, definidos como Sucesos no deseados en la etapa anterior.

Quedando la relación de SB por equipo y Suceso TOP, según las *Tabla 3.5 (Derrame)* y *Tabla 3.6 (Incendio)*. Para los *derrames en las torres de destilación*, se analizaron las causas raíces para cada desviación de forma independiente (*Tablas 3.2 y 3.4*), y en los casos de *derrames en los hornos (Tablas 3.1 y 3.3)*, se unieron las desviaciones similares. Quedan representados en la *Tabla 3.5* de la siguiente forma:

F-101A: desviaciones 281 y 287; **F-101B:** desviaciones 290 y 292; **F-102 A:** desviaciones 479 y 485; **F-102 B:** desviaciones 482 y 488.

T-101A: desviación 330; **T-101B:** desviación 333; **T-102 A:** desviación 513; **T-102 B:** desviación 532; **T-102 C:** desviación 579; **T-102 D:** desviación 637; **T-102 E:** desviación 673.

Tabla 3.5. Sucesos básicos que pueden provocar el Suceso TOP (Derrame).

SUCESOS BÁSICOS (SB)	F-101		F-102		T-101		T-102					
	A	B	A	B	A	B	A	B	C	D	E	
SB1. No actuación inmediata del operador	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SB2. Altas temperaturas en T-101												
SB3. Agresividad en el crudo nacional	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	X	X	X	X	X		X					X
SB8. Avería en el sistema de lubricación	X	X	X	X	X		X					X
SB9. Descuido del operador	X	X	X	X	X		X	X	X			
SB10. Falta de capacitación del operador	X	X	X	X	X	X	X				X	X
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación		X			X		X		X	X	X	X
SB13. Mala calidad de la instrumentación		X			X			X				
SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores					X							
SB15. Alto contenido de agua en el crudo de inyectó					X							
SB16. Cierre de válvula por error operacional, fallo propio o tras un mantenimiento						X			X			
SB17. Composición del crudo, depende de API (ligereza).						X						
SB18. Fallo en la instrumentación del sistema de enfriamiento					X							

Tabla 3.6. Sucesos básicos que pueden provocar el Suceso TOP (Incendio).

SUCESOS BÁSICOS (SB)	F-101	F-102	T-101	T-102
SB1. No actuación inmediata del operador	X	X	X	X
SB2. Altas temperaturas en T-101	X	X	X	X
SB3. Agresividad en el crudo nacional	X	X	X	X
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	X	X	X	X
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	X	X	X	X
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	X	X	X	X
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	X	X	X	X
SB8. Avería en el sistema de lubricación	X	X	X	X
SB9. Descuido del operador	X	X	X	X
SB10. Falta de capacitación del operador	X	X	X	X
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	X		X	X
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	X		X	X
SB13. Mala calidad de la instrumentación	X		X	X
SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores			X	
SB15. Alto contenido de agua en el crudo de inyectó			X	
SB16. Cierre de válvula por error operacional, fallo propio o tras un mantenimiento			X	X
SB17. Composición del crudo, depende de API (ligereza).			X	
SB18. Fallo en la instrumentación del sistema de enfriamiento			X	

3.4. Estimación de la probabilidad o frecuencia esperada para los SB.

Tabla 3.7. Probabilidad o frecuencia esperada para SB definidos.

SUCESOS BÁSICOS (SB)	PROBABLIDAD	
	Fallo (equipo o proceso)*	Error humano**
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02	
SB2. Altas temperaturas en T-101	1,0E+00	
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados		1,0E-03
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	
SB9. Descuido del operador		3,5E-03
SB10. Falta de capacitación del operador		3,5E-03
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones		3,5E-03
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación		2,0E-03
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	
SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores	2,0E-03	
SB15. Alto contenido de agua en el crudo de inyectó	1,0E-03	
SB16. Cierre de válvula por error operacional		3,5E-03
SB17. Composición del crudo, depende de API (ligereza).	1,0E-03	
SB18. Fallo en la instrumentación del sistema de enfriamiento	2,0E-03	

*La probabilidad de *fallo de los equipos o procesos* se estimó a partir de datos de experiencias reportadas en la bibliografía consultada, referidas a equipos y procesos similares a los que se evalúan en este estudio.

**La probabilidad de *error humano* se estimó con la ayuda del método TESEO, considerado que los sucesos SB9, SB10, SB11 y SB16, son: actividades rutinarias simples (K1=0,001); que el operador dispone de suficiente tiempo para actuar (K2=0,5); que el operador está bien adiestrado (K3=0,5); que puede estar en situación de emergencia potencial (K4=2) y que el factor ergonómico (K5=7), por las malas condiciones de trabajo en la instalación. Para el SB4, se tomó el valor del error general de omisión, del método TESEO.

3.5. Identificación de la combinación de fallos y errores que puedan conducir al daño, Sucesos Intermedios (SI) y Secuencias.

Los SI, al igual que los SB, se identificaron para cada secuencia de eventos por niveles, en correspondencia con el equipo y tipo de Suceso TOP, como se relacionan en la *Tablas 3.8 (Derrame)*.

Tabla 3.8. Sucesos intermedios que pueden provocar el Suceso TOP (Derrame).

EQUIPO	DERRAME - SUCESOS INTERMEDIOS (SI)	
	NIVEL I	NIVEL II
F-101A	Obstrucciones en la línea a F-101 y en los tubos de las secciones	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Fallo de la bomba de inyector de crudo P-105 A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de la bomba • Sucesos básicos
	Tupiciones en el banco de intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Rotura (caída de cuñas) de las válvulas	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
F-101B	Obstrucciones en la línea a F-101 y en los tubos de las secciones	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Fallo de la bomba de inyector de crudo P-105 A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de la bomba
	Tupiciones en el banco de intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Rotura (caída de cuñas) de las válvulas	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fuga en el sistema (averías en tubos, platillos, rajaduras)	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fallo de la instrumentación (control)	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
F-102A	Obstrucciones en los tubos de las secciones del horno F-102	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Fallo de la bomba de fondo de T-101, P-109 A/C/D	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fallo de la válvula de salida del horno F-102	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
F-102B	Tupición en la zona de convección	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Fallo de la bomba de fondo de T-101, P-109 A/C/D	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Tupición en la válvula de salida del fuel oil de T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Rotura (caída de cuñas) de las válvulas de T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fallo de la Neumática de fondo	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
T-101A	Obstrucción en línea de salida hacia los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
	Tupiciones dentro del condensador	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Sucesos básicos
	Fallo de la bomba de reflujo en tope P-101 A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de la bomba • Sucesos básicos
	Fallo del sistema de enfriamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fallo del lazo de control de presión en D-103	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
T-101B	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Baja presión en T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en el sistema (averías en tubos, platillos, rajaduras) • Sucesos básicos
	Obstrucción en los platos superiores de la torre T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos

	Fugas en línea hasta los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en el sistema (averías en tubos, platillos, rajaduras) • Sucesos básicos
	Obstrucción en los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
T-102A	Rotura (caída de cuñas) de las válvulas a la salida de T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Tupición en la zona de convección de F-102	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Fallo de la Neumática de fondo	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Tupición en la válvula de salida del fuel oil de T-101	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de corrosión. • Mala calidad de la materia prima
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fugas en las tuberías hasta T-102	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Obstrucciones en la línea de crudo reducido	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
	Fallo de la bomba de reflujo en tope P-109 A/C	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de la bomba • Sucesos básicos
T-102B	Poros en las tuberías (succión)	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Exceso de vapor en el fondo de T-102	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Alta temperatura en el agua de enfriamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
T-102C	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fugas en la línea hasta los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Obstrucción en los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
T-102D	Obstrucción en el enfriador	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
	Rotura (caída de cuñas) de las válvulas	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fugas en la línea de diésel de vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en el sistema (averías en tubos, platillos, rajaduras) • Otras causas no desarrolladas
	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
T-102E	Error del operador	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos
	Fallo de la bomba P-105 A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de la bomba • Sucesos básicos
	Tupición en el filtro de P-105A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
	Obstrucciones en la línea de crudo	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de la materia prima • Sucesos básicos
	Fugas en la línea de inyectos o hacia el intercambiador.	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesos básicos

Los SI del *Incendio* son la suma de los SI por equipos definidos en el derrame, más la fuente de ignición (Nivel I) con un SB y Sucesos no desarrollados (Nivel II).

3.6. Definición del alcance, resolución y reglas generales del AFE.

El *alcance* del AFE a desarrollar en este caso de estudio, se limitará a evaluar los 15 factores de riesgo que puedan generar, según las evaluaciones previas, los mayores daños a la instalación, las personas y el medio ambiente, referidos como **derrames de combustibles e incendios**,

Sucesos TOP más probables en las áreas de riesgo seleccionadas dentro del proceso de refinación de petróleo de la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán.

La *resolución* del AFE considerará, de forma general, dos niveles en la definición de las secuencias de Sucesos intermedios que lo conforman, y un tercer nivel con los SB o causas raíces que generan al Suceso TOP. El nivel de *resolución*, en este caso de estudio, se ha ajustado a los objetivos de la investigación, los escasos datos disponibles y el poco tiempo disponible para el concluir el trabajo.

En la aplicación de la metodología se respetan, en lo fundamental, las *reglas generales* de diseño de los AFE, con las modificaciones o adecuaciones explicadas en propuesta metodológica. Las consideraciones realizadas, que caracterizan este caso de estudio, se explican en el desarrollo de las etapas de trabajo.

3.7. Construcción de los AFE.

Para este caso de estudio, en correspondencia con las desviaciones seleccionadas en la *etapa 1* y los Sucesos TOP definidos en la *etapa 2*, se diseñaron y construyeron 15 AFE: 11 AFE que representan las secuencias de sucesos para posibles *derrames* en los cuatro equipos de referencia y cuatro (4) AFE, un AFE por equipo, con las secuencias de fallos y errores más probables para la ocurrencia de *incendios* (*Anexos 4.1-4.8*), que se relacionan a continuación:

Anexo 4.1 AFE DERRAME F-101 (*F-101A* y *F-101B*).

Anexo 4.2 AFE DERRAME F-102 (*F-102 A* y *F-102 B*).

Anexo 4.3 AFE DERRAME T-101 (*T-101 A* y *T-101B*).

Anexo 4.4 AFE DERRAME T-102 (*T-102 A*; *T-102 B*; *T-102 C*; *T-102 D* y *T-102 E*).

Anexo 4.5 AFE INCENDIO F-101.

Anexo 4.6 AFE INCENDIO F-102.

Anexo 4.7 AFE INCENDIO T-101.

Anexo 4.8. AFE INCENDIO T-102.

3.8. Obtención de los CMF.

Para cada uno de los 15 AFE construidos en la *etapa 7* se obtuvo el CMF, los detalles del análisis de cada uno de los AFE aparecen en los mismos anexos, relacionados en la *etapa 7*. A continuación, se resumen los resultados de los CMF para cada AFE, en las *Tablas 3.9.-3.23*.

Tabla 3.9. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-101A (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04

Tabla 3.10. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-101B (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,13	6,00E-05

Tabla 3.11. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-102A (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05

SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04

Tabla 3.12. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-102B (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04

Tabla 3.13. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-101A (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,13	6,00E-05

SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores	2,0E-03	1,14	6,00E-05
SB15. Alto contenido de agua en el crudo de inyector	1,0E-03	1,15	3,00E-05
SB18. Fallo en la instrumentación del sistema de enfriamiento	2,0E-03	1,18	6,00E-05

Tabla 3.14. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-101B (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB16. Cierre de válvula por error operacional	3,5E-03	1,16	1,05E-04
SB17. Composición del crudo, depende de API (ligereza).	1,0E-03	1,17	3,50E-06

Tabla 3.15. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102A (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05

Tabla 3.16. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102B (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,13	6,00E-05

Tabla 3.17. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102C (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,9	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05
SB16. Cierre de válvula por error operacional	3,5E-03	1,16	1,05E-04

Tabla 3.18. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102D (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04

SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05
--	---------	------	----------

Tabla 3.19. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102E (Derrame)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101			
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,3	3,00E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,4	3,00E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,5	3,00E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,6	3,00E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,7	6,00E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,8	6,00E-05
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,12	6,00E-05

Tabla 3.20. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-101 (Incendio)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101	1,0E+00		
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,2,3	3,0E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,2,4	3,0E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,2,5	3,0E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,2,6	3,0E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,2,7	6,0E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,2,8	6,0E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,2,9	1,1E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,2,10	1,1E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,2,11	1,1E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,2,12	6,0E-05
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,2,13	6,0E-05

Tabla 3.21. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE F-102 (Incendio)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101	1,0E+00		
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,2,3	3,0E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,2,4	3,0E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,2,5	3,0E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,2,6	3,0E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,2,7	6,0E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,2,8	6,0E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,2,9	1,1E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,2,10	1,1E-04

Tabla 3.22. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-101 (Incendio)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101	1,0E+00		
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,2,3	3,0E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,2,4	3,0E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,2,5	3,0E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,2,6	3,0E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,2,7	6,0E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,2,8	6,0E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,2,9	1,1E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,2,10	1,1E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,2,11	1,1E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,2,12	6,0E-05
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,2,13	6,0E-05
SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores	2,0E-03	1,2,14	6,0E-05
SB15. Alto contenido de agua en el crudo de inyectó	1,0E-03	1,2,15	3,0E-05
SB16. Cierre de válvula por error operacional	3,5E-03	1,2,16	1,1E-04
SB17. Composición del crudo, depende de API (ligereza).	1,0E-03	1,2,17	3,0E-05
SB18. Fallo en la instrumentación del sistema de enfriamiento	2,0E-03	1,2,18	6,0E-05

Tabla 3.23. Conjuntos Mínimos de Fallos del AFE T-102 (Incendio)

Suceso básico (SB)	Probabilidad del SB (P_{SB})	Conjunto Mínimo de Fallos (CMF)	Probabilidad del CMF (P_{CMF})
SB1. No actuación inmediata del operador	3,0E-02		
SB2. Altas temperaturas en T-101	1,0E+00		
SB3. Agresividad en el crudo nacional	1,0E-03	1,2,3	3,0E-05
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	1,0E-03	1,2,4	3,0E-05
SB5. Alto contenido de sales en la materia prima	1,0E-03	1,2,5	3,0E-05
SB6. Alto nivel de sedimentos en la materia prima	1,0E-03	1,2,6	3,0E-05
SB7. Fallo de la instrumentación de la bomba	2,0E-03	1,2,7	6,0E-05
SB8. Avería en el sistema de lubricación	2,0E-03	1,2,8	6,0E-05
SB9. Descuido del operador	3,5E-03	1,2,9	1,05E-04
SB10. Falta de capacitación del operador	3,5E-03	1,2,10	1,05E-04
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	3,5E-03	1,2,11	1,05E-04
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	2,0E-03	1,2,12	6,0E-05
SB13. Mala calidad de la instrumentación	2,0E-03	1,2,13	6,0E-05
SB14. Fallo de la válvula de entrada a los condensadores	3,5E-03	1,2,16	1,05E-04

3.9. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos TOP.

Tabla 3.24. Probabilidad de ocurrencia de Derrame e Incendio por equipos (Resumen).

EQUIPO		PROBABILIDAD - SUCESOS NO DESEADOS	
		DERRAME	INCENDIO
HORNO	F-101A	5,55E-04	6,75E-04
	F-101B	6,75E-04	
HORNO	F-102A	4,50E-04	4,50E-04
	F-102B	4,50E-04	
TORRE	T-101A	8,25E-04	9,60E-04
	T-101B	4,39E-04	
TORRE	T-102A	6,15E-04	7,80E-04
	T-102B	3,30E-04	
	T-102C	4,95E-04	
	T-102D	3,90E-04	
	T-102E	5,10E-04	

3.10. Evaluación de las medidas de importancia de los SB.

Los 18 SB definidos fueron evaluados para determinar *su importancia* dentro de la estructura secuencial de cada uno de los 15 AFE diseñados y construidos. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para cada AFE. En los (*Anexos 1-8*) aparecen los cálculos para cada caso.

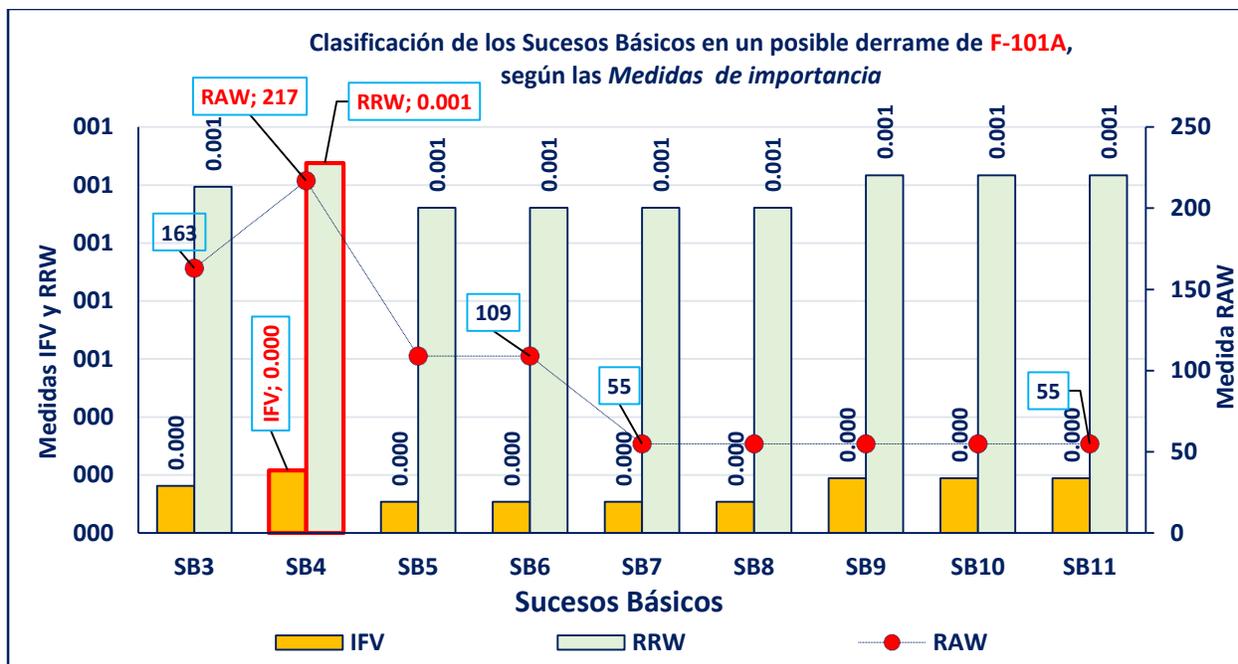


Figura 3.1. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame F-101A)

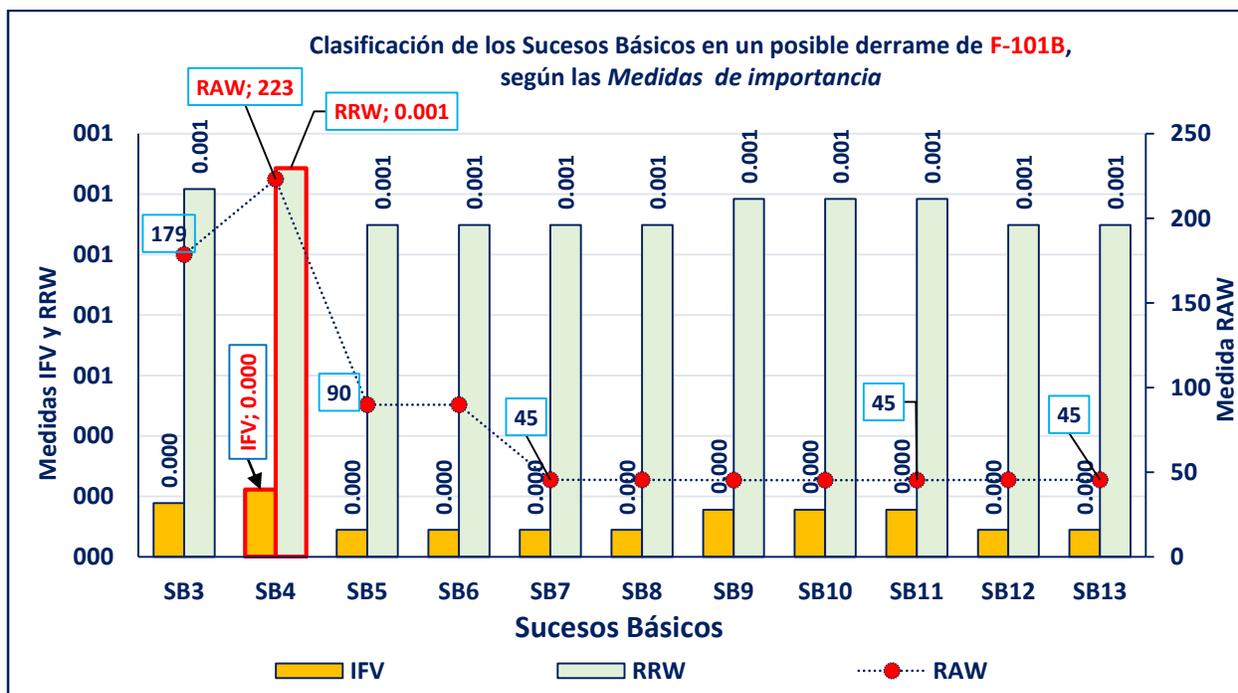


Figura 3.2. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame F-101B)

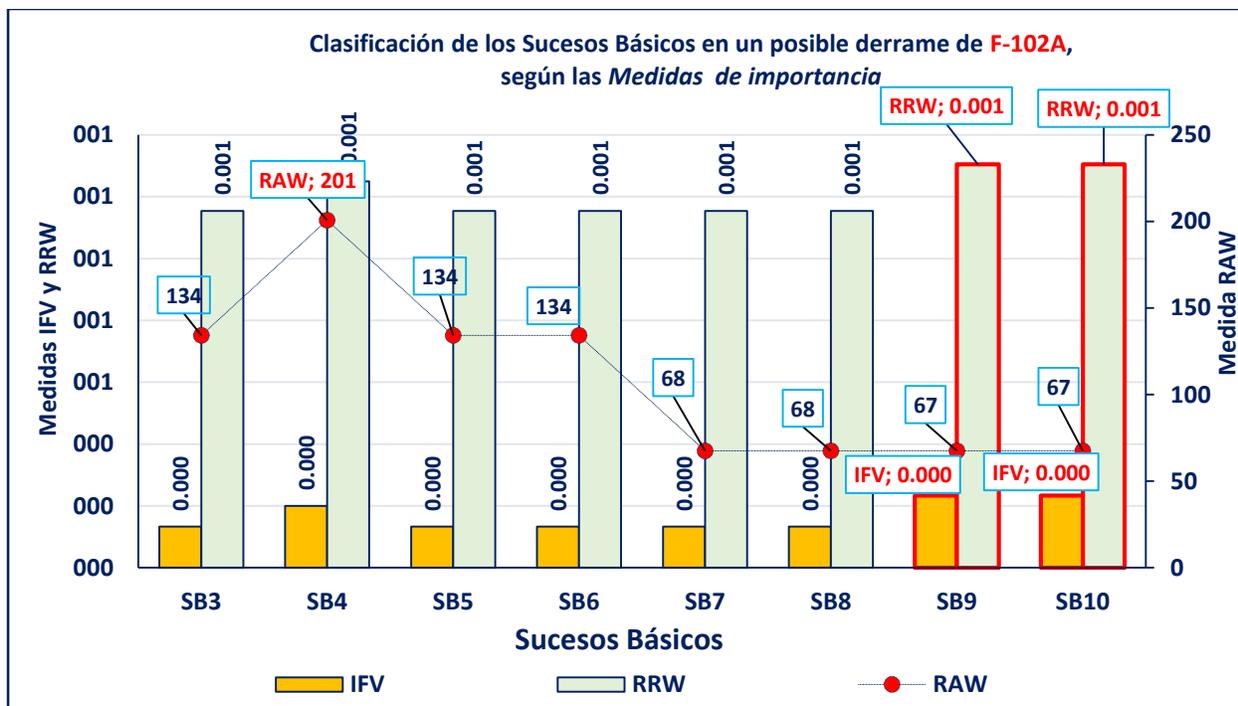


Figura 3.3. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame F-102A)

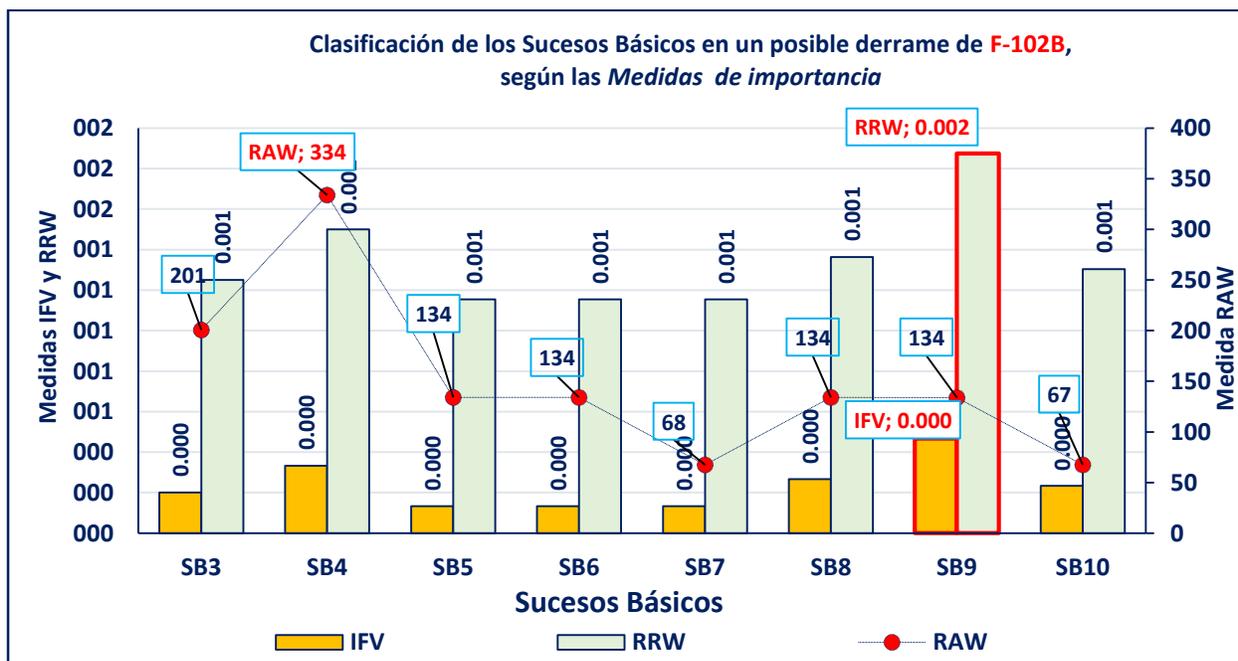


Figura 3.4. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame F-102B)

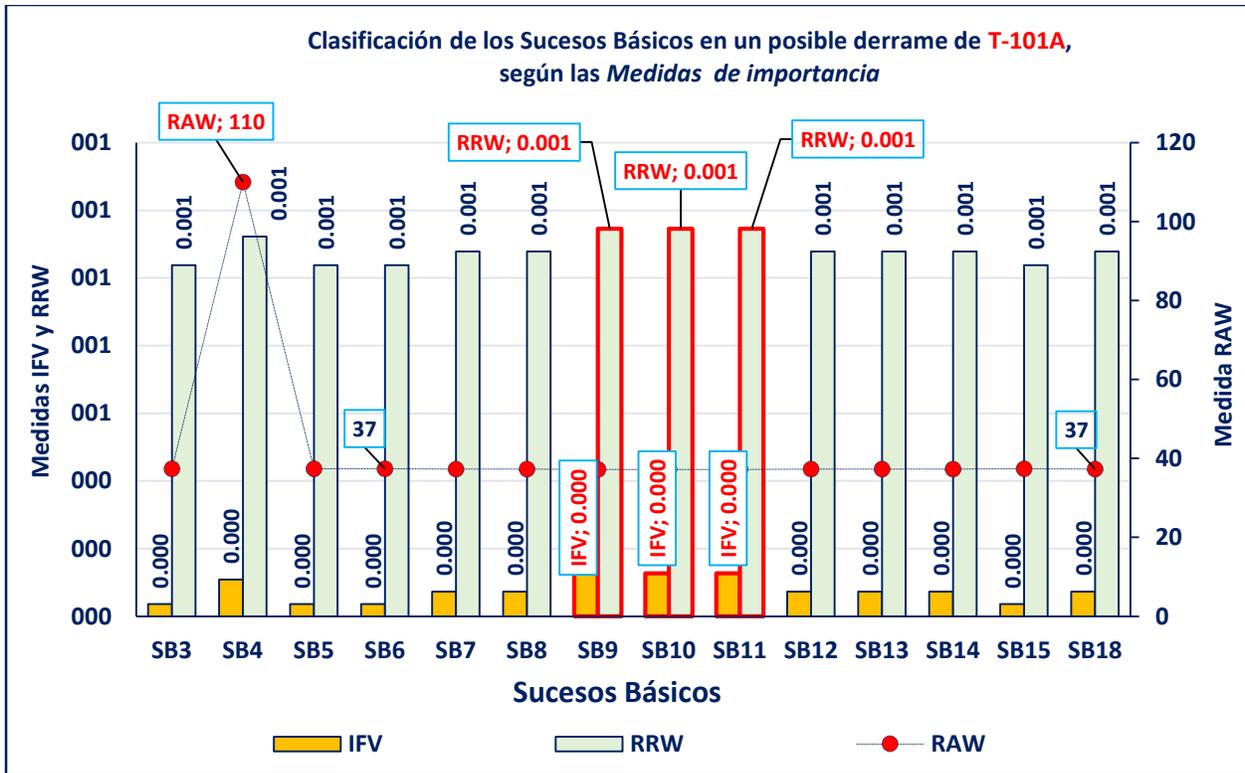


Figura 3.5. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-101A)

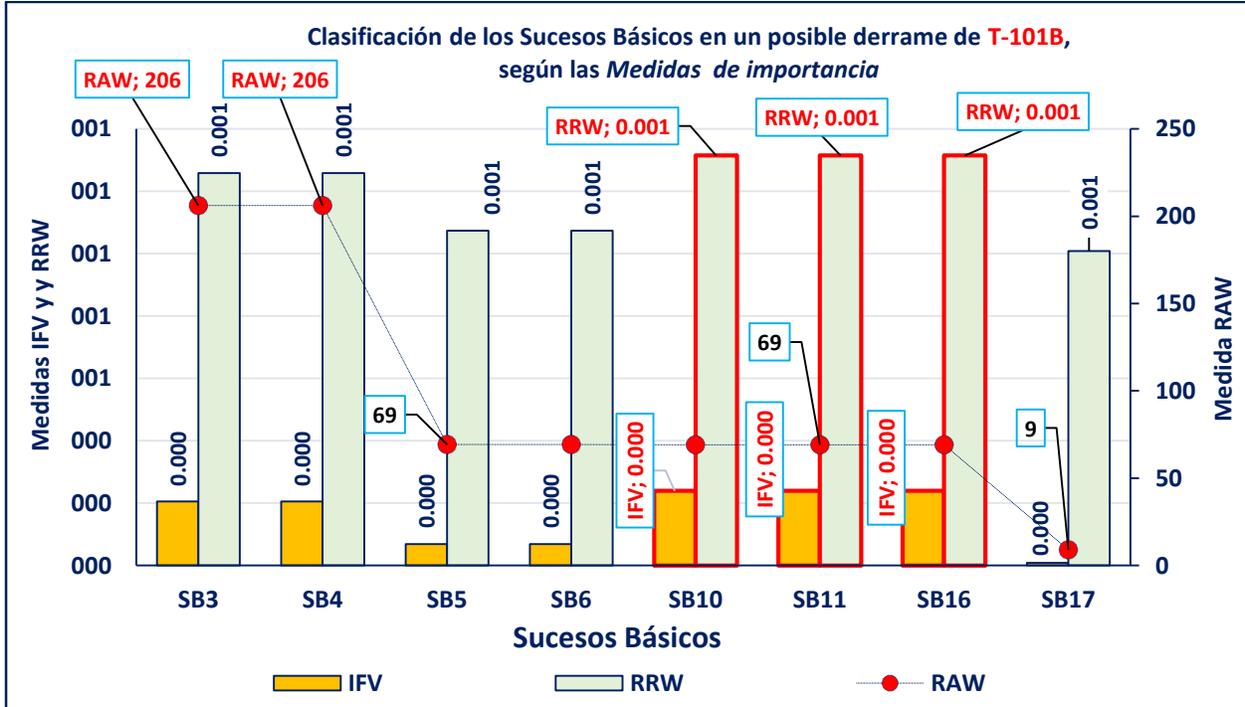


Figura 3.6. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-101B)

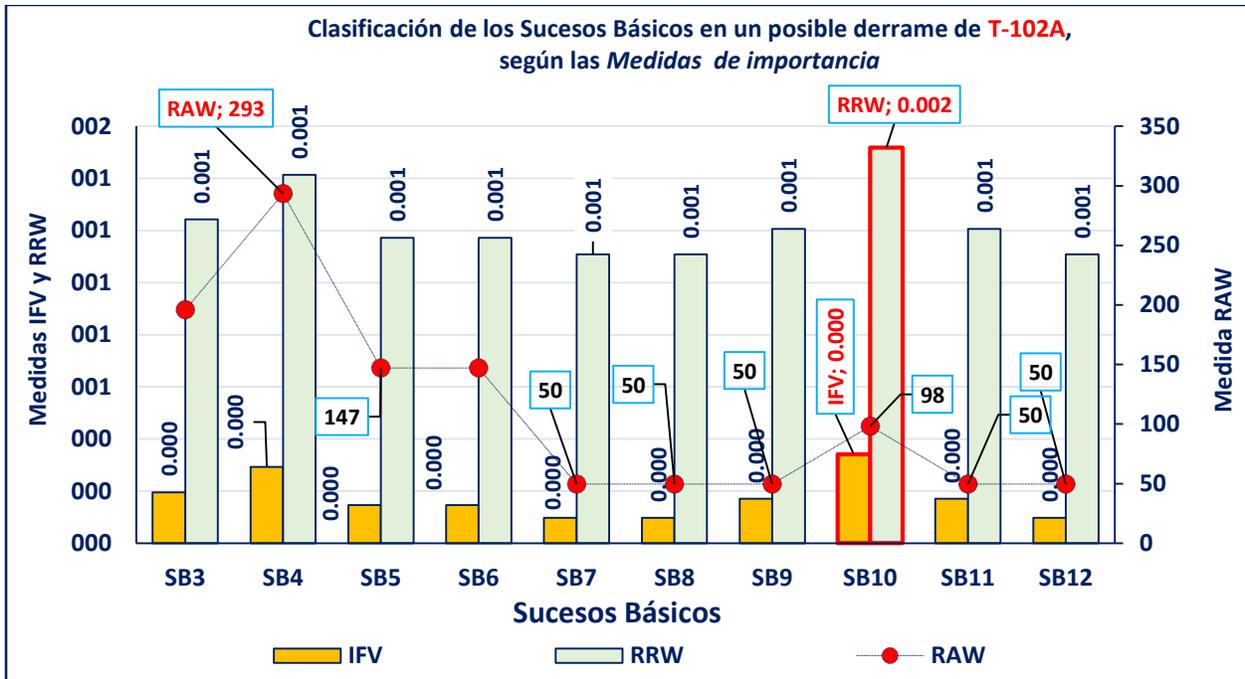


Figura 3.7. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-102A)

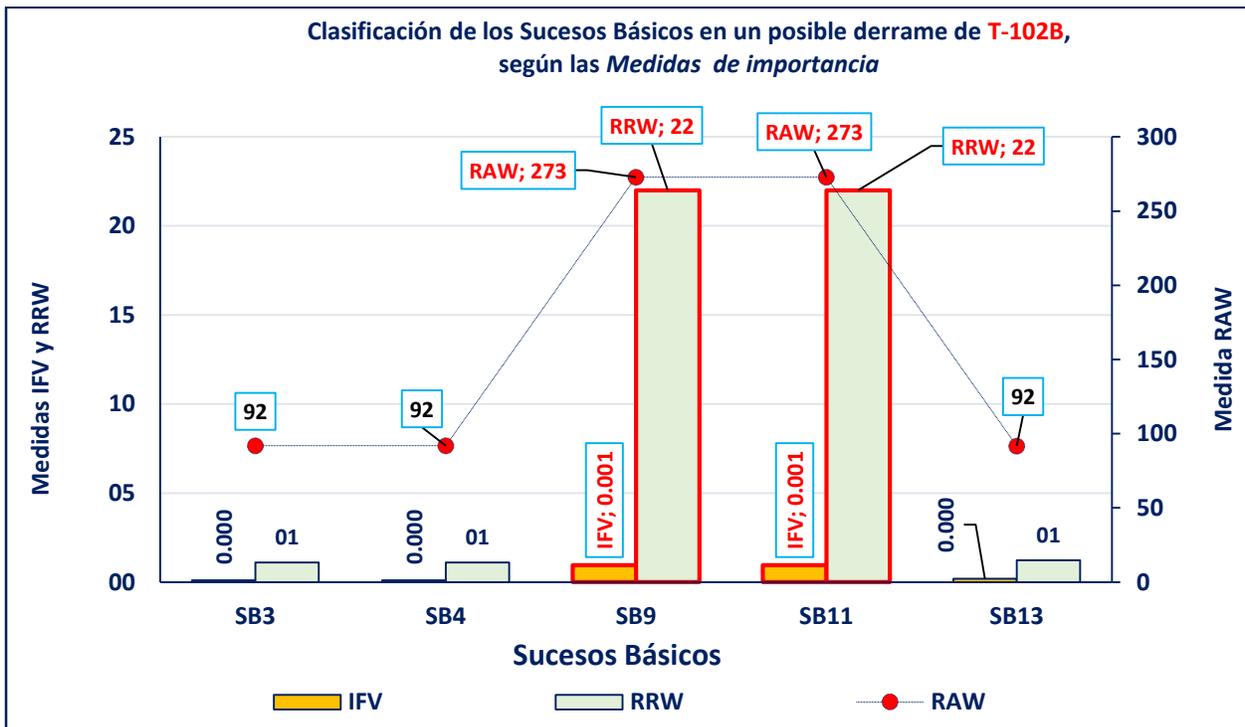


Figura 3.8. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-102B)

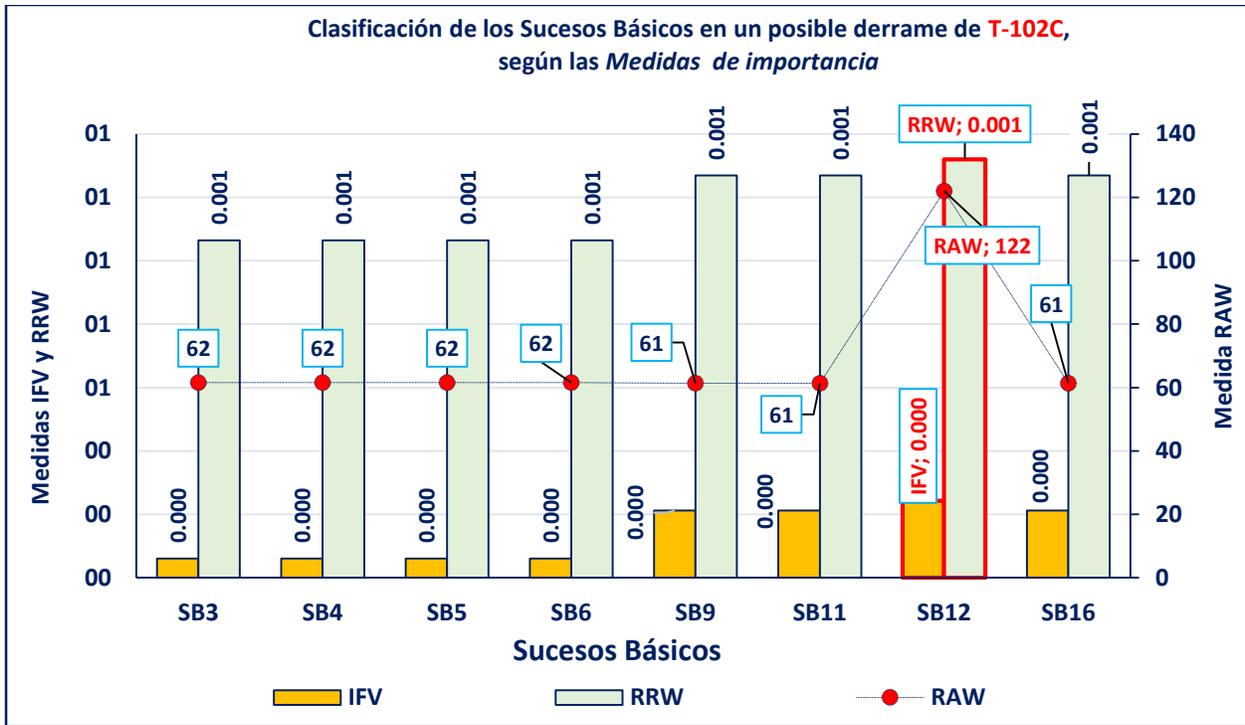


Figura 3.9. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-102C)

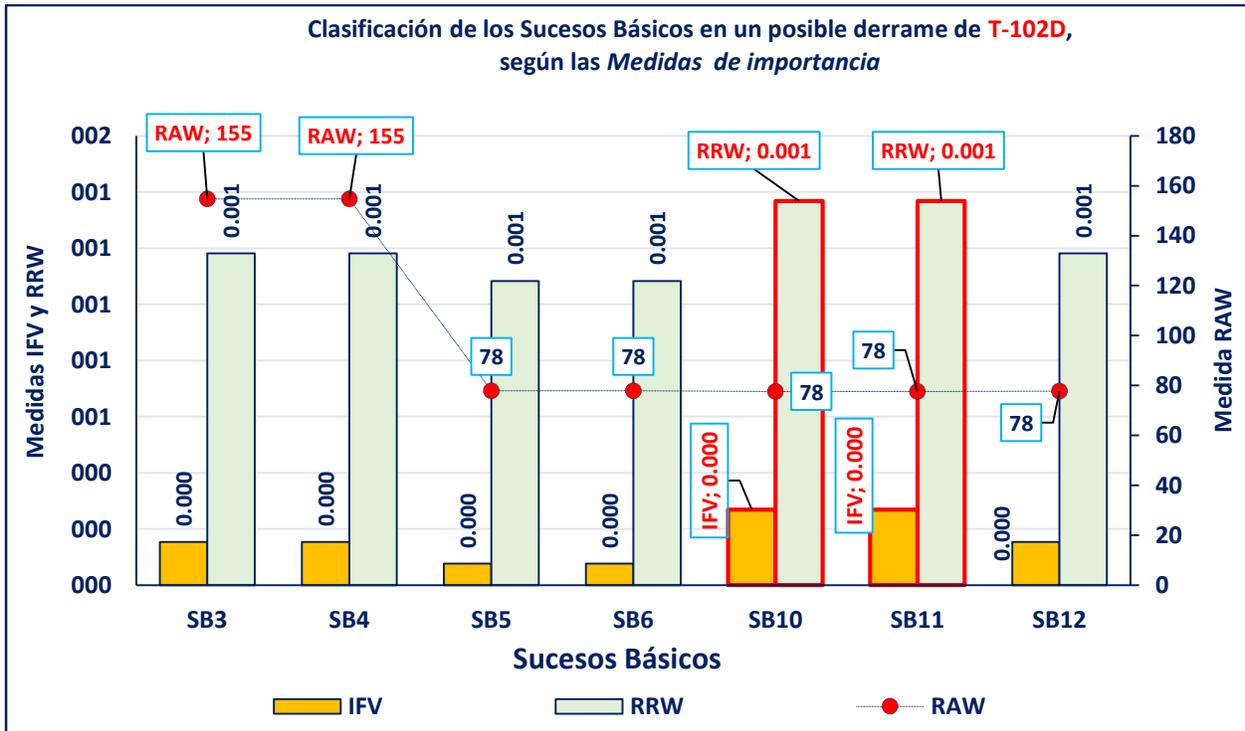


Figura 3.10. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-102D)

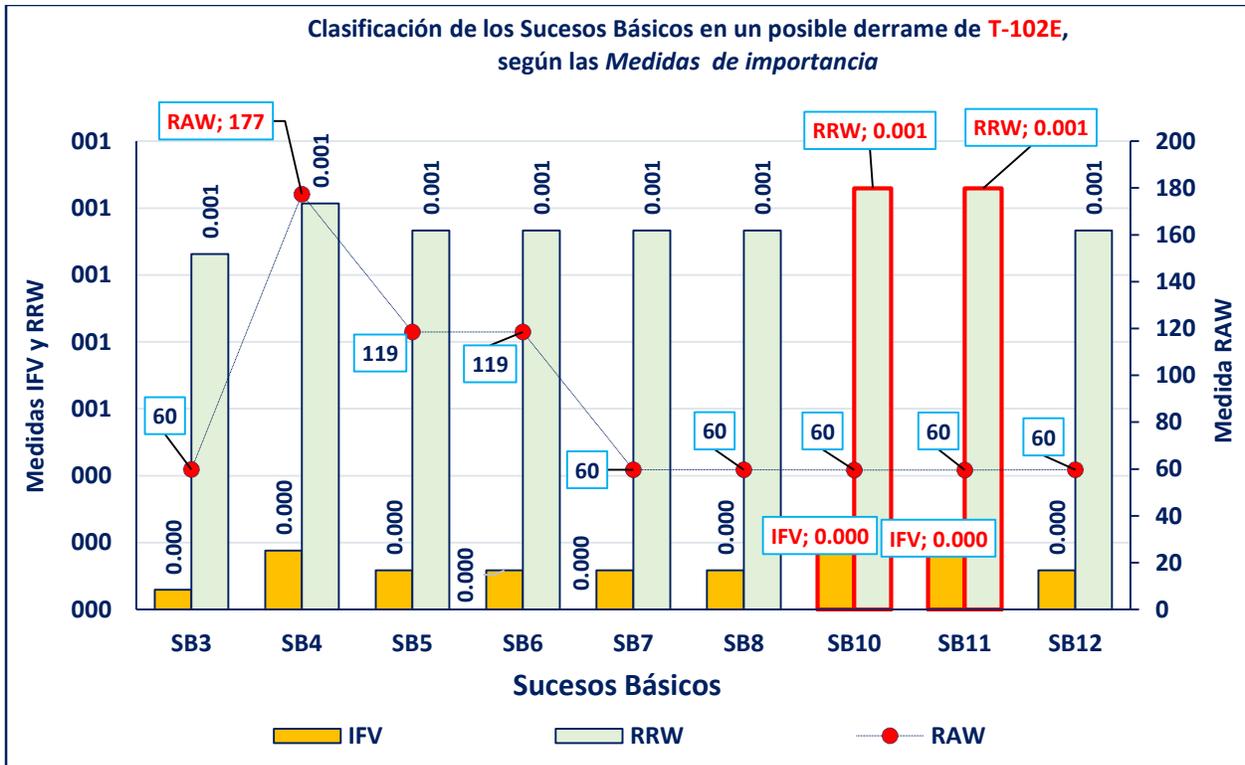


Figura 3.11. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Derrame T-102E)

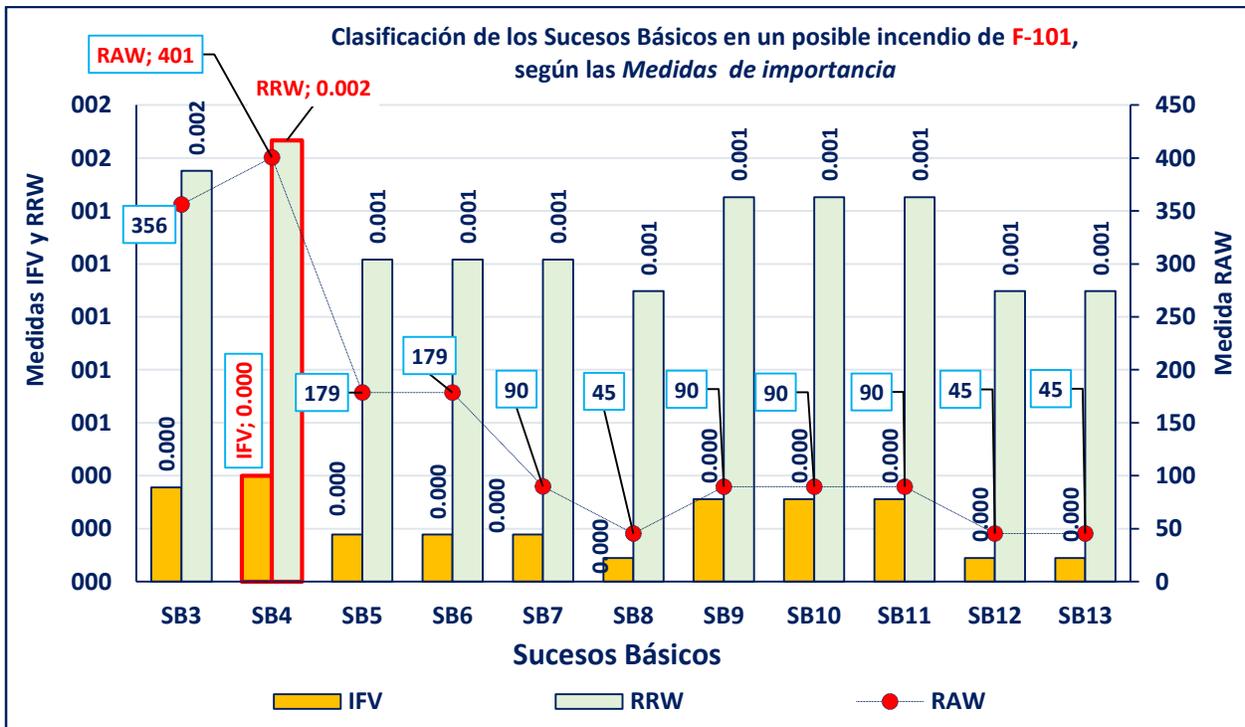


Figura 3.12. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Incendio F-101)

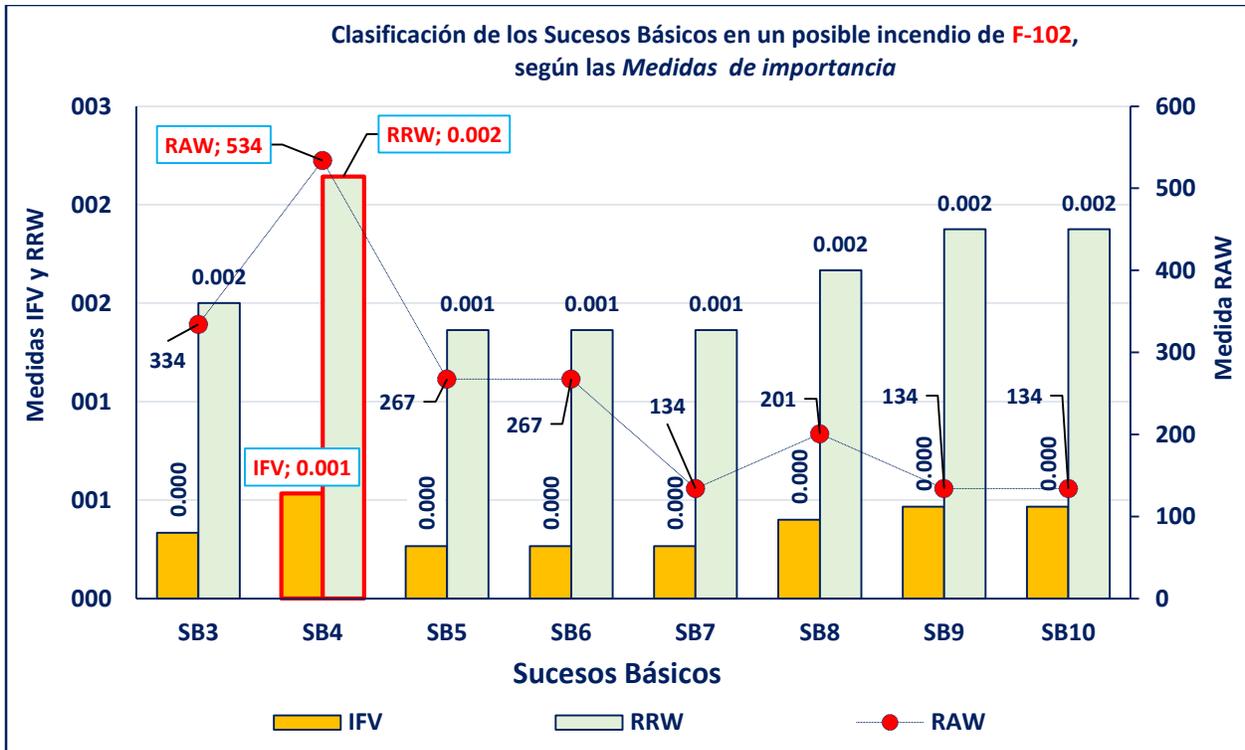


Figura 3.13. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Incendio F-102)

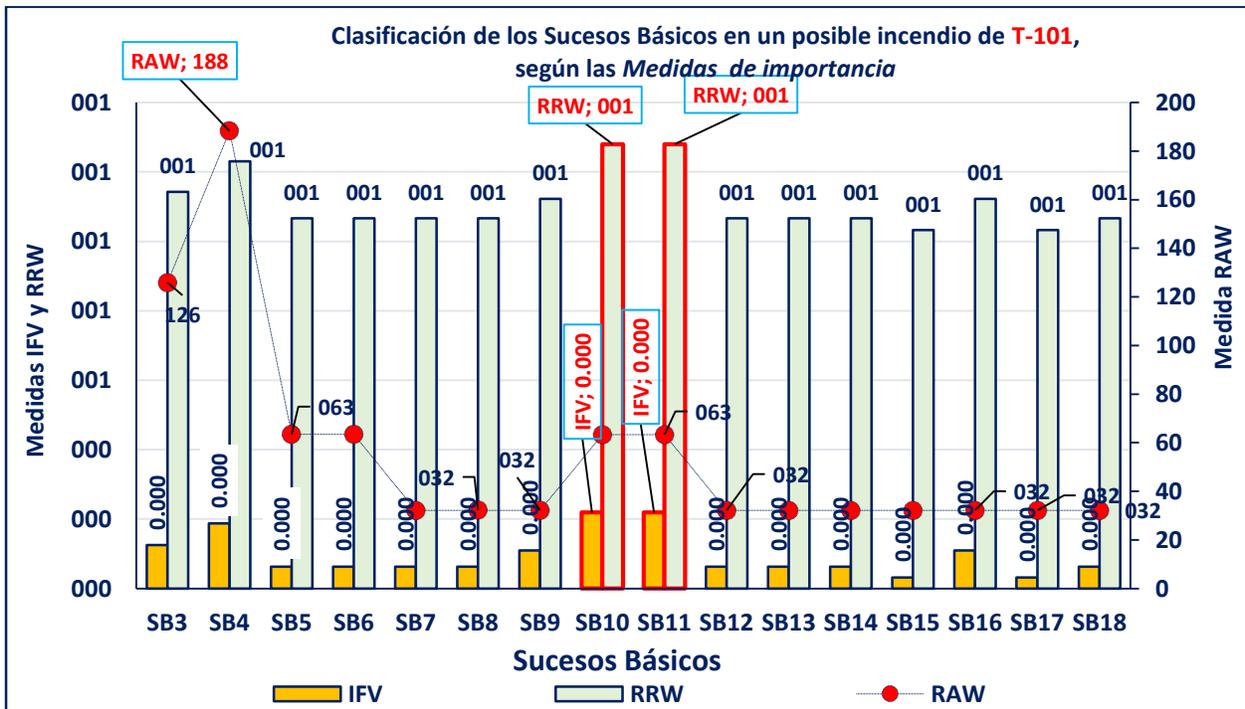


Figura 3.14. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Incendio T-101)

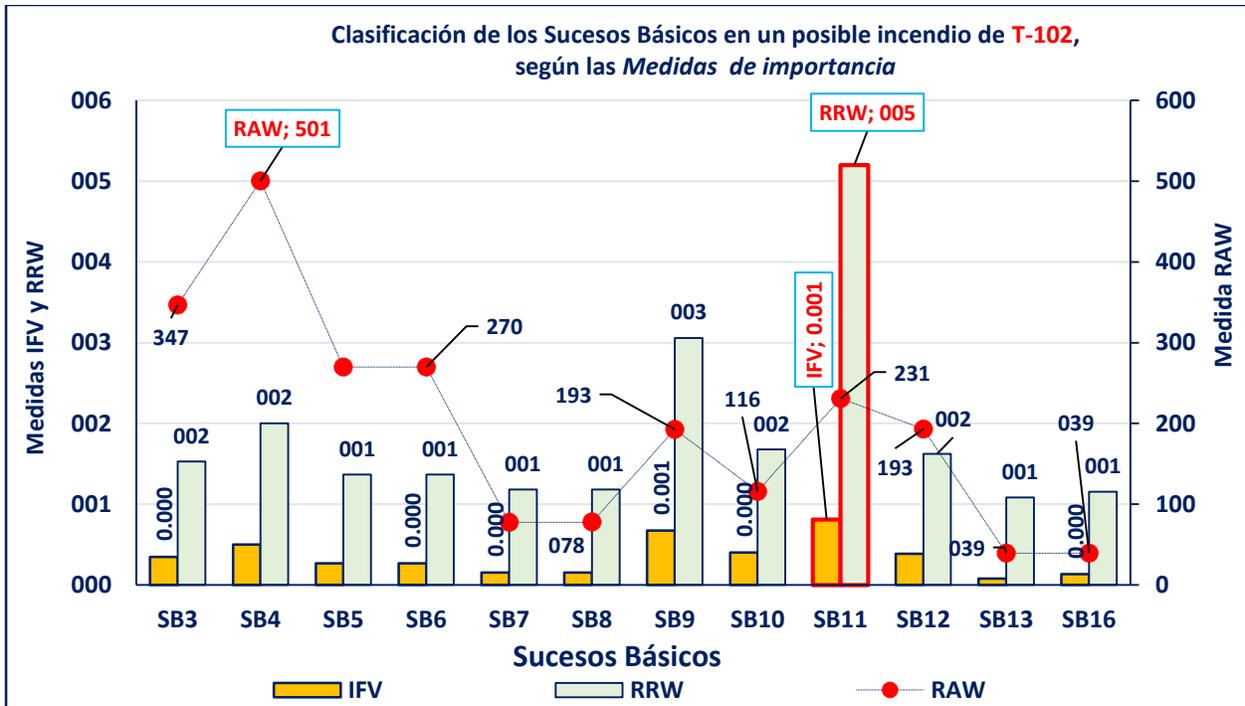


Figura 3.15. Resultados de la evaluación de medidas de importancia (Incendio T-102)

Análisis de los resultados que se grafican:

A. Importancia por contribución o Fussell-Vesely (IFV) al TOP DERRAME, la mayor IFV se otorga (por el número de veces con valor mayor en los AFE) en el siguiente orden: SB10 (6); SB11 (5); SB9 (4); SB4 (2); SB12 (1); SB16 (1). Lo que significa que estos SB son los que más contribuyen a que se produzca un derrame, se recomienda evitar que se generen, (Figuras 3.1-3.11).

B. Importancia por contribución o Fussell-Vesely (IFV) al TOP INCENDIO, la mayor IFV se otorga a: SB4 (2); SB11 (2); SB10 (1). Lo que significa que estos SB son los que más contribuyen a que se produzca un incendio, se recomienda evitar que se generen, (Figuras 3.12-3.15).

C. Incremento en riesgo o Risk Achievement Worth (RAW) al TOP DERRAME, la mayor RAW se otorga a: SB4 (9); SB3 (2); SB9 (1); SB11 (1); SB12 (1). Lo que significa que si estos SB ocurren sería perjudicial para la fiabilidad y/o seguridad del equipo que se evalúa (si la probabilidad de estos SB fuera uno), (Figuras 3.12-3.15).

D. Incremento en riesgo o Risk Achievement Worth (RAW) al TOP INCENDIO, la mayor RAW se otorga a: SB4 (4). Lo que significa que si SB4 ocurre sería perjudicial para la fiabilidad y/o seguridad para los cuatro equipos que se evalúan, (Figuras 3.12-3.15).

E. Reducción de riesgo o Risk Reduction Worth (RRW) al TOP DERRAME, la mayor RRW se otorga a: SB10 (6); SB11 (5); SB9 (4); SB4 (2); SB12 (1); SB16 (1). Lo que significa que si estos

SB se mejoran o evitan sería beneficioso para la fiabilidad y/o seguridad del equipo que se evalúa, (Figuras 3.12-3.15).

F. Reducción de riesgo o Risk Reduction Worth (RRW) al TOP INCENDIO, la mayor RRW se otorga a: SB4 (2); SB11 (2); SB10 (1). Lo que significa que si estos SB se mejoran o evitan sería beneficioso para la fiabilidad y/o seguridad del equipo que se evalúa (si la probabilidad de estos SB fuera cero), (Figuras 3.12-3.15).

En la *Tabla 3.25*, resumen del análisis, se puede observar que de los siete (7) SB que resultaron con los valores mayores en la evaluación de importancia (en sus tres medidas): seis (6) son producto de *errores humanos* (referidos a errores de operación y falta o violación del ciclo de mantenimiento). El SB3 se refieren a *fallos de equipos o proceso*, en este caso, las afectaciones por la agresividad del crudo nacional y el inadecuado tratamiento que se le da como materia prima.

Tabla 3.25. Resumen del análisis de importancia de los Sucesos Básicos.

Sucesos básicos más importantes	Veces con mayor valor de importancia	Tipo de Suceso	
		Fallo (equipo o proceso)	Error humano
SB3. Agresividad en el crudo nacional	2	X	
SB4. Violación de los ciclos de mantenimiento planificados	21		X
SB9. Descuido del operador	9		X
SB10. Falta de capacitación del operador	14		X
SB11. Lecturas incorrectas de las mediciones	15		X
SB12. Falta de mantenimiento de la instrumentación	3		X
SB16. Cierre de válvula por error operacional, fallo propio o tras un mantenimiento	2		X

Teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de importancia, se deben plantear las estrategias de actuación y tomar medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de estos SB, considerando su tipo y el impacto que pueden tener sobre la *fiabilidad y/o seguridad* de los equipos evaluados.

3.11. Evaluación de las actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos (SB).

A partir del *Hazop* de referencia, *Tablas 3.1-3.4*, y posteriores consultas a varios especialistas de las áreas de riesgo en estudio, se consideraron la aplicación de cuatro (4) actuaciones o medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los SB más importantes, asignándole un peso de impacto sobre los SB de influencia equivalente a 0,5% para cada una de las actuaciones siguientes:

Actuación 1: Revisión y mantenimiento planificado (A1).

Actuación 2: Correcto tratamiento a la materia prima (A2).

Actuación 3: Instalar termodiales e indicadores de flujo en la entrada y salida de los hornos (A3).

Actuación 4: Capacitación y evaluación del operador (A1).

Los resultados obtenidos para cada AFE y tipo de TOP, se resumen en la *Tabla 3.26*. En los *Anexos del 1 al 8*, aparecen los cálculos de la evaluación de las acciones sobre los SB para disminuir la probabilidad de ocurrencia de *Derrame e Incendio* por equipos, en correspondencia con cada AFE y los SB que involucran.

Tabla 3.26. Resumen de la evaluación de las actuaciones para disminuir la probabilidad de ocurrencia de Derrame e Incendio por equipos.

EQUIPO		PROBABILIDAD - DERRAME		PROBABILIDAD - INCENDIO	
		Antes de las acciones	Después de las acciones	Antes de las acciones	Después de las acciones
HORNO	F-101A	5,55E-04	2,78E-06	6,75E-04	3,38E-06
	F-101B	6,75E-04	3,38E-06		
HORNO	F-102A	4,50E-04	2,25E-06	4,50E-04	2,25E-06
	F-102B	4,50E-04	2,25E-06		
TORRE	T-101A	8,25E-04	4,13E-06	9,60E-04	4,80E-06
	T-101B	4,39E-04	2,19E-06		
TORRE	T-102A	6,15E-04	3,08E-06	7,80E-04	3,90E-06
	T-102B	3,30E-04	1,65E-06		
	T-102C	4,95E-04	2,48E-06		
	T-102D	3,90E-04	1,95E-06		
	T-102E	5,10E-04	2,55E-06		

3.12. Representación gráfica y análisis de los resultados.

A continuación, se representan gráficamente los resultados generales, obtenidos por la aplicación de la Metodología a las principales áreas de riesgo de las instalaciones de producción de la Refinería de petróleo “Sergio Soto”, en lo referente a las probabilidades globales, *antes y después* de aplicar las medidas para *disminuir la probabilidad de ocurrencia* de los eventos TOP y aplicación de las medidas de importancia a los equipos, en su conjunto. Los cálculos de esta etapa se presentan en el *Anexo 5* de este estudio.

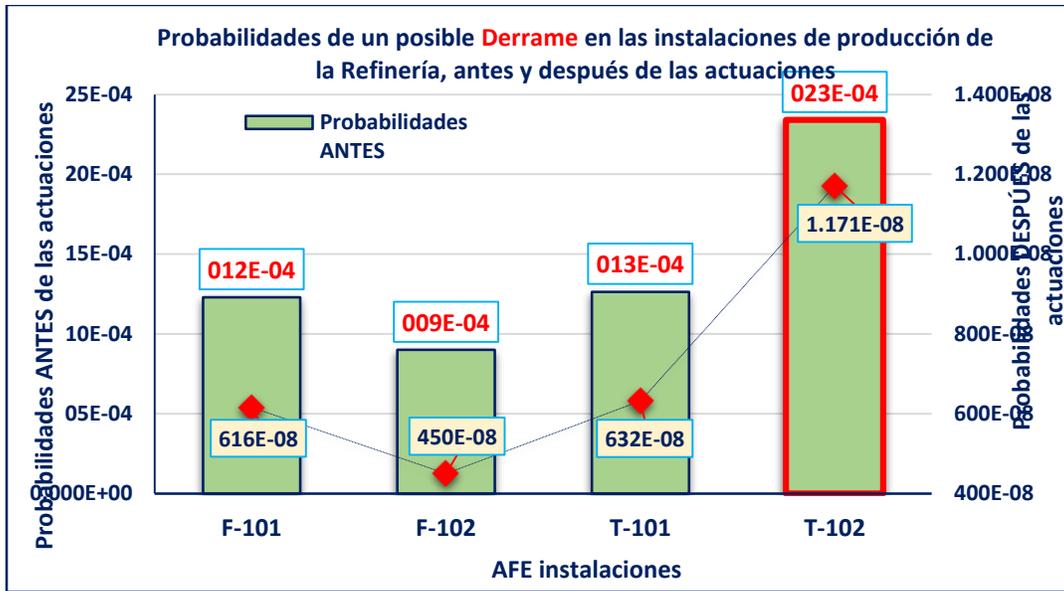


Figura 3.16. Resultados de la evaluación de las probabilidades generales de derrame en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería.

Análisis de la Figura 3.16, se observa que la mayor probabilidad ($2,34E-03$) de *derrame* está en la torre de destilación al vacío (T-102). En este equipo, al aplicar las medidas para *disminuir la probabilidad de ocurrencia de derrame*, se estima que la probabilidad llegue al valor ($1,17E-05$), lo que representa una disminución significativa, y por consiguiente la efectividad de las medidas para evitar derrames.

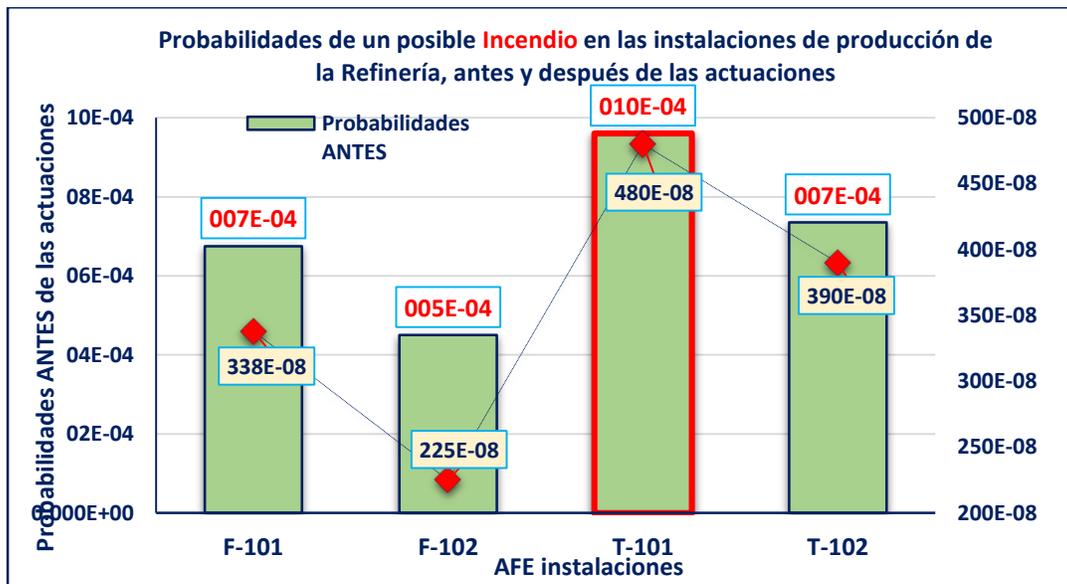


Figura 3.17. Resultados de la evaluación de las probabilidades generales de incendio en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería.

Análisis de la Figura 3.17, se observa que la mayor probabilidad ($9,60E-04$) de *incendio* está en la torre de destilación atmosférica (T-101). En este equipo, al aplicar las medidas para *disminuir la probabilidad de ocurrencia de derrame*, se estima que la probabilidad llegue al valor ($4,80E-06$), lo que representa una disminución significativa, y por consiguiente la efectividad de las medidas para evitar incendios.

Análisis de la Figura 3.18, se presentan los resultados generales de la evaluación de las medidas de importancia ante un posible *derrame* en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería, quedando como sigue:

- ✓ *Importancia por contribución (IFV) y Reducción de riesgo (RRW)* evaluadas ante un posible *derrame*, otorgan la mayor significación a la torre de destilación al vacío (T-102), en correspondencia con el valor más elevado de probabilidades de ocurrencia de este evento TOP (*Figura 3.16*).
- ✓ *Incremento en riesgo (RAW)*, para el *derrame*, evalúa al horno (F-102) con los valores más significativos, lo que representa *perjuicio* a la fiabilidad y/o seguridad de la instalación en caso de ocurrir este evento TOP (*probabilidad=1*).
- ✓ *Medida de importancia Birnbaum* otorga el mayor valor al horno (F-102), lo que significa que un *derrame* en este equipo causaría el mayor evalúa *perjuicio* a la fiabilidad y/o seguridad de la instalación, en correspondencia con la posición que ocupa dentro del proceso y su secuencia representada en el AFE, independientemente de la probabilidad de ocurrencia. Valor que se corresponde con el incremento del riesgo (RAW)

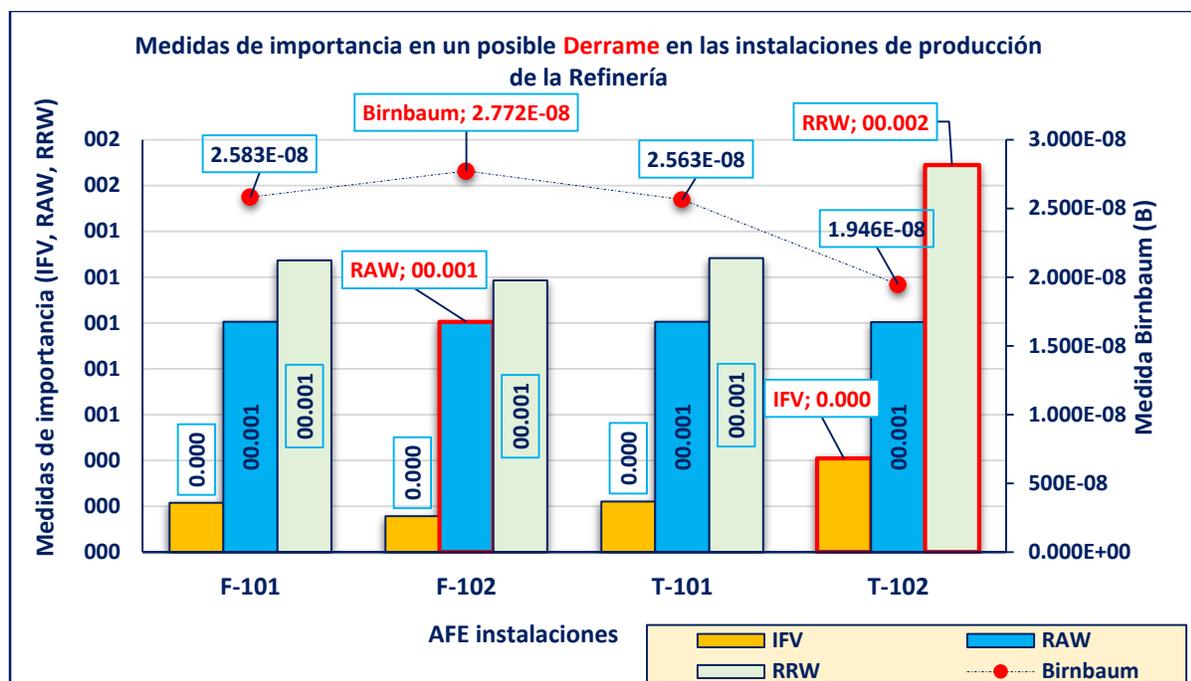


Figura 3.18. Resultados de la evaluación de las medidas de importancia ante un posible Derrame en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería.

Analisis de la Figura 3.19, se presentan los resultados generales de la evaluación de las medidas de importancia ante un posible incendio en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería, quedando como sigue:

- ✓ *Importancia por contribución (IFV) y Reducción de riesgo (RRW)* evaluadas ante un posible incendio, otorgan la mayor significación a la torre de destilación atmosférica (T-101), en correspondencia con el valor más elevado de probabilidades de ocurrencia de este evento TOP (Figura 3.17).
- ✓ *Incremento en riesgo (RAW)*, para el incendio, evalúa al horno (F-102) con los valores más significativos, lo que representa perjuicio a la fiabilidad y/o seguridad de la instalación en caso de ocurrir este evento TOP (probabilidad=1).
- ✓ *Medida de importancia Birnbaum* otorga el mayor valor al horno (F-102), lo que significa que un incendio en este equipo causaría el mayor evalúa perjuicio a la fiabilidad y/o seguridad de la instalación, en correspondencia con la posición que ocupa dentro del proceso y su secuencia representada en el AFE, independientemente de la probabilidad de ocurrencia. Valor que se corresponde con el incremento del riesgo (RAW)

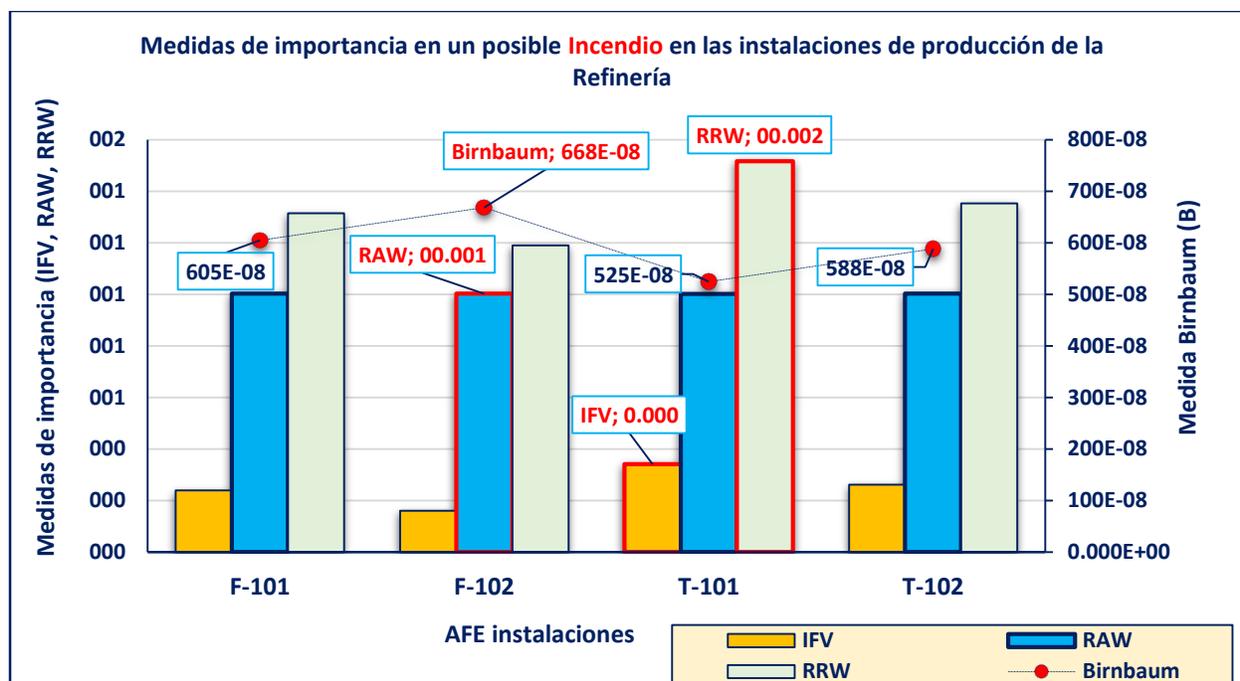


Figura 3.19. Resultados de la evaluación de las medidas de importancia ante un posible Incendio en los equipos evaluados de las instalaciones de producción de la Refinería.

3.13. Conclusiones parciales

1. La adición de nuevos procedimientos, definidos técnicamente por etapas, al Árbol de Fallos y Errores (AFE) convencional, posibilita la simplificación de este análisis tradicionalmente complejo.
2. La estructura metodológica propuesta permite un flujo adecuado para la evaluación probabilística del riesgo de accidente mayor, considerando las medidas de importancia y el impacto de medidas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de los Sucesos básicos más importantes.
3. Los procedimientos en el análisis de riesgo tecnológico de accidente mayor de la propuesta metodológica del Árbol de Fallos y Errores (AFE), se validaron exitosamente, en todas sus etapas, al aplicarse a los principales equipos y procesos del área de producción de la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán, con resultados satisfactorios y creíbles.

Conclusiones

1. La propuesta metodológica, que se presenta en este estudio, con la adecuación de los procedimientos del Árbol de Fallos y Errores (AFE) para su aplicación como técnica para el análisis de riesgo tecnológico, facilita la determinación de la probabilidad del riesgo individual en escenarios de accidente mayor en la industria química, donde se conjuguen diversos fallos y errores.
2. La aplicación de la metodología a los principales equipos y procesos del área de producción de la Refinería “Sergio Soto Valdés” de Cabaiguán, permitió validar la funcionalidad y adecuación de cada uno de los procedimientos metodológicos propuestos, y evaluar la probabilidad del riesgo tecnológico en una instalación de peligro mayor.
3. Los resultados que se obtienen, de su aplicación, permiten trazar estrategias de trabajo, tales como, la planificación del mantenimiento y la capacitación de los operadores, así como tomar medidas para la mejora final de la fiabilidad de los equipos y sus componentes y la seguridad de la instalación de alto riesgo.
4. El equipo evaluador obtiene conocimientos exhaustivos del funcionamiento de los procesos y de los diferentes modos de fallos y errores resultantes de las posibles alteraciones o desviaciones de las múltiples variables que condicionan el sistema en estudio.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta de los resultados y conclusiones de este trabajo, se recomienda:

1. Utilizar los métodos y procedimientos propuestos, como guía para el análisis probabilístico del riesgo tecnológico en instalaciones con peligro mayor. Considerando, lógicamente, las adecuaciones correspondientes a cada caso de estudio.
2. Que los investigadores involucrados en estudios de riesgo en instalaciones de peligro mayor, valoren y utilicen los resultados obtenidos en la aplicación práctica de esta metodología, como *ejemplo* que les facilite la evaluación probabilística de casos reales de estudio.
3. Que los resultados obtenidos en el caso de estudio sean valorados y utilizados, por la dirección técnica de la Refinería de petróleo “Sergio Soto Valdés” de Cabaiguán, en la toma de decisiones futuras, sobre todo en aquellos aspectos relacionados con la mejoría de la seguridad tecnológica de dicha instalación.

Bibliografía

1. (INSHT), I. N. D. S. E. H. D. T. 1983. *"Índices de incendio y explosión"Guía para la clasificación de riesgos* Barcelona, Centro Nacional de Condiciones del Trabajo.
2. (INSHT), I. N. D. S. E. H. D. T. 1995. *Índices de riesgo de procesos químicos*, Barcelona.
3. ACOSTA.D. 2011. *"Análisis de Riesgos en Espacios Confinados en Refinerías de Petróleo"* [Online]. Venezuela. Available: <http://www.sigweb.cl>.
4. ÁLVAREZ, R. 1998. *Los accidentes más graves de mundo en refinerías* [Online]. Available: <http://www.ultimasnoticias.com.ve/noticias/actualidad/infografia--accidentes-en-refinerias-mas-graves-de.aspx#ixzz3rwmh0p8Y>.
5. AMENDOLA.A 1997. Approaches to risk analysis in the European Union. *SéminaireEuroforum: AnalyseQuantitative des Risques*. París, Francia. .
6. ARAVENA, R. 2016. Incendios en industrias químicas. *HSEC*. Chile.
7. ARÍSTIDES, R. A. 1990. *Procedimiento para la valoración cuantitativa de los riesgos. Métodos de los árboles de fallos*, Madrid, COASHIQ.
8. AZOFRA.J.J 1974. *Organización de la seguridad e higiene en la industria química*, COASCHI.
9. BODURTHA.T.F 1980. *Industrial Explosion Prevention and Protection*, New York, Book Company.
10. BOE 1995. *Prevención de riesgos laborales*. Madrid.
11. CARLIZZA, P. 2015. El factor humano en la evaluación de riesgos:comparación entre las diversas técnicas.
12. CASAL, J. 1999. *Métodos de evaluación de riesgos en la industria química*.
13. CASAL, J., MONTIEL, H., PLANAS, E. & VÍLCHEZ, J. A. 2001. *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*, Barcelona,España.
14. CASAL.J & COLL.T 1992. *Evaluación experimental del riesgo en plantas de proceso, Ingeniería Química.*, Madrid.
15. CETESB 2004. *Accidentes químicos:aspectos relativos a la salud.Guía para la preparación y respuesta.* , São Paulo.
16. CREUS.A 1992. *Fiabilidad y seguridad.Su aplicación en procesos industriales*, Marcombo, Barcelona.
17. DELGADO, E. G. septiembre-2012. *Protección contra incendios en refinerías*. Universidad Pontificia Comillas.
18. DOWELL.A & WILLIAMS.T 2005. *Layer of Protection Analysis:Generating Scenarios Automatically from Hazop Data*.

19. FERRUZ.R, PEÑA.J.A & SANTAMARÍA.J. 1999. *Seguridad*. Universidad de Zaragoza.
20. FIGALLO, A. V. 2012. *Claves para la gestión de riesgos*. USMP, Universidad de San Martín de Porres.
21. GRACIA, J. M. S. D. 2001. *Manual de Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Petroleras*, Madrid.
22. HERNÁNDEZ, J. 2000. *Guía Técnica:Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos* [Online]. Available: http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/quiatec/Metodos_cuantitativos/cuant_232.htm.
23. HERNÁNDEZ, O. 1995. *Accidentes de refinerías en el mundo*. [Online]. Available: <https://tigrepelvar6.wordpress.com/2012/08/30/accidentes-de-refinerias-en-el-mundo/>
24. HUTTE.H 1968. *Manual del Ingeniero*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili.
25. IBARRA.E marzo-2014. "Técnicas utilizadas para la identificación y valoración de los peligros en las distintas etapas de la vida de los procesos químicos industriales" *Revista Centro Azúcar*
26. JIMÉNEZ, R. abril-2010. *Manual Técnico 2-Evaluación de Riesgos en la Empresa* [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/html/849/84911698004>.
27. KING.R 1990. *Safety in the Process Industries*, Londres, Butterworth-Heinemann.
28. KIRWAN, B. 1992. *Human error identification in human reliability assessment*.
29. KLETT.T 1992. *Hazop and Hazan,Identifying and assessing process industry hazards*.
30. LARREA.J & ANITUA.P 1994. *Manual básico de protección contra incendios en la industria*, Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz.
31. LEÓN, L. P. 2011. *Evaluación de riesgos en la refinería "Sergio Soto Valdés" de Cabaiguán*. Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas.
32. LEÓN, L. P. 2015. *Evaluación de los riesgos de accidentes graves en los procesos tecnológicos de la Refinería "Sergio Soto Valdés" de Cabaiguán*. Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas.
33. LLOPART, S. C. junio-2001. *Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales aplicando el Análisis Histórico*. Universidad Politécnica de Catalunya.
34. MUJLIONOV, I. P., AVERBUJ, A. Y., FURMER, I. E. & TUMARKINA, E. S. 1979. *Fundamentos Teóricos de la Tecnología Química*.
35. PÉREZ, O. Á. junio-2006. *Resistencia Número 61*. [Online]. Available: <http://www.biodiversidadla.org/> . .

36. POSADA.M. 1999. *Análisis y valoración de riesgos en seguridad industrial*.
37. PRODUCCIÓN, M. D. L. 2015. *Reglamento Tecnológico para las Plantas de Destilación Atmosférica y al Vacío y Planta de aceites Básicos*, Unión Cuba –Petróleo. .
38. QUÍMICA, P. D. N. U. P. E. M. A. Y. E. P. I. D. S. 1999. Evaluación de riesgos químicos. *Módulo de capacitación No 3*.
39. RAMOS.A 1990. *Procedimiento para la valoración cuantitativa de los riesgos*, Madrid, COASHIQ.
40. ROBAINA.A.C. & CHIG.D. 1995. Sistema de información epidemiológica en empresa de producciones metálica(COMETAL). Ciudad Habana: Instituto de Medicina del Trabajo.
41. RODRÍGUEZ, C. J. 2010. *Práctica 1 de Fiabilidad* [Online]. Available: http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/leganes/ing_industrial/estadistica_industria/l/practicas/Practica1de%20Fiabilidad.pdf.
42. SALUD, O. M. D. L. 2005. Centro de Conocimiento en Salud Pública y Desastres. Canadá.
43. SALVADO, R. 2009. *Determinación de modos de fallos y sus efectos en máquinas de la industria petroquímica*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. .
44. SANTAMARÍA.R & BRAÑA.A.P 1994. *Análisis y reducción de riesgos en la industria química*, Madrid, Fundación MAPFRE.
45. SCODELARO, F. 05/01/2015. *Los 9 Peores Desastres de la Industria Química* [Online]. Available: <http://www.ultimasnoticias.com.ve/noticias/actualidad/infografia--accidentes-en-refinerias-mas-graves-de.aspx#ixzz3rwmh0p8Y>.
46. SEGURIDAD, I. N. D. 2009. Análisis de Árbol de Fallos.
47. SWAIN.A.D & GUTTMAN.H.E 1983. *Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, Albuquerque, Sandia Nuclear Laboratories.
48. TRABAJO, I. N. D. S. E. H. E. E. 1994. Análisis propabilístico de riesgos:Metodología del "Árbol de fallos y errores".
49. TRABAJO, I. N. D. S. E. H. E. E. 2001. Fiabilidad humana:métodos.
50. WALLS, L. 2003. *The bleve*.
51. ZAROR.C.A 2003. *Introducción a la ingeniería Ambiental para la industria de procesos*.

Anexos

Anexo 1Tabla 1.1. Ejemplo de accidentes en la industria del petróleo a nivel mundial.

Accidentes	Causas	Observaciones	Referencia bibliográfica
Explosión en una refinería española de REPSOL-YPF en Puertollano	El accidente ocurrió en la Unidad 100 del área de Refinería y Conversión por la presencia de una posible bolsa de gas en una torre de destilación de crudo o en el techo flotante de uno de los tanques de gasolina en contacto con alguna fuente de calor o eléctrica. El estallido de ese gas hizo que se incendiaran uno tras otro los siete tanques de gasolina que componían el cubeto.	9 muertos y varios heridos por quemaduras	http://www.proteccioncivil-andalucia.org/Informes/RefinPuertollano.htm
Accidente en una refinería de México (PEMEX)	Una grúa que maniobraba en las instalaciones de Pemex se enganchó un cable de alta tensión fuera de servicio cerca del taller de tuberías y derribó un poste, el cual cayó sobre tres trabajadores.	Fallecieron 3 personas, las cuales eran ayudantes de operarios y tuberos.	http://www.losrecursoshumanos.com/contenidos/434
Incendio y explosión en una planta petroquímica en Sulphur, USA.	Incendio y explosión en la petroquímica Westlake de la localidad de Sulphur, al romperse una tubería con etileno y provocar un incendio	Resultó herido un empleado	http://www.unizar.es/guiar/1/
Incendio de un camión cargado con gasolina en Chicago.	Incendio de un camión cisterna cargado con gasolina que sufrió un accidente y se incendió posteriormente.	Hubo un muerto	http://www.unizar.es/guiar/1/

Tabla 1.2. Accidentes en la refinería de petróleo “Sergio Soto Valdés”.

Accidentes	Causas	Observaciones
Principio de incendio Caldera B-607	Se determina que la causa principal sea la acumulación en demasía de fuel oíl en el tubo de alimentación de la caldera debido a la cantidad de arrancadas efectuadas. Entrada de aire y gases por la chimenea de la caldera permitiendo la alimentación al humo producido por la arrancada, propiciando las condiciones para el comienzo del incendio.	Realización del mantenimiento planificado
Salidero de vapores de Nafta por la parte superior de la Torre T- 101	Se evidencia en inspección realizada posteriormente a la falla, la falta de mantenimiento que existe en la Torre T-101, la cual está prevista intervenir en la reparación de planta planificada por inversiones para este año.	Reparar la torre T-101
Tupición en el Horno F-102	Se realizó la inspección visual del horno detectándose 22 tubos con problemas en la zona de radiación, dos de ellos perforados al martillar, con alto contenido de cáscaras y por dentro capas de un óxido formado por el alto contenido de azufre que presenta el crudo conformado (crudo venta supertanqueros Matanzas) además de los años de vida de los tubos (más de 10 años de explotación) también el combustible utilizado en el horno es fuel oíl de 3.5 % de azufre.	Salidero por un tubo de la zona de radiación.

Anexo 2

Descripción del proceso tecnológico en las refinerías de petróleo

Planta de Destilación Atmosférica

El petróleo crudo procedente de los tanques de almacenamiento es bombeado por la bomba P-105 A o B a través de los intercambiadores de calor E-203 A, B, C, D, E, F, G y H que corresponden a reflujo tope vacío, queroseno, diésel, corte lateral ligero (R3), reflujo intermedio o diésel, fondo de vacío, corte lateral pesado (R2) o fuel y fondo de vacío (también puede ser extracción de plato cinco). En estos intercambiadores el crudo se calienta por el calor cedido por las corrientes anteriores hasta una temperatura alrededor de 190°C.

El petróleo crudo se divide en dos ramas y entra al horno F-101 donde se eleva la temperatura hasta 320–340°C. El crudo parcialmente vaporizado entra en la zona de alimentación de la torre T-101. La parte vaporizada asciende y el líquido cae en la zona de despojamiento la que posee tres platos de copas en el fondo de la torre.

Los vapores despojados en el fondo, más la parte vaporizada del crudo y el vapor de agua ascienden en la zona de rectificación, compuesta por quince platos de copas y un plato de malla.

Por los platos siete y nueve se extrae el corte de diésel por cajas de extracción parcial. Este producto entra a la torre despojadora T-103 que posee tres platos de copas donde se despoja de los productos más ligeros ajustando el punto de inflamación mediante la inyección de vapor de agua al fondo de esta torre. El corte despojado es bombeado por la bomba P-102B a través del intercambiador de calor E-203C y siempre que presente la acidez por encima del valor establecido (0.6) se envía al tratamiento con sosa cáustica y posteriormente es enviado al tanque de producción TK-43.

El queroseno se extrae de los platos trece, catorce, quince y dieciséis, este producto entra a la torre despojadora T-102 que posee tres platos de copas donde se despoja de los productos más ligeros ajustando el punto de inflamación mediante la inyección de vapor de agua al fondo de esta torre. El corte despojado es bombeado por la bomba P-102A, a través del intercambiador de calor E-203B y el enfriador E-105B y posteriormente es enviado a los tanques de almacenamiento.

El solvente se extrae por los platos dieciséis, diecisiete y diecinueve por cajas de extracción parcial, pasando a enfriarse en uno de los bancos de condensadores de tope y de ahí se envían por gravedad a sus respectivos tanques de almacenamiento.

Por el tope de la torre T-101 salen los gases, el vapor de agua, vapores de nafta y reflujo tope pasando a los condensadores E-103A y B, E-103C y D donde se enfrían y condensan estos vapores, de aquí pasan al tambor separador de tope D-103. En este tambor ocurre la separación de los gases no condensables, nafta y agua.

Parte de la nafta se retorna a la torre T-101 mediante la bomba P-101A o B como reflujo al tope y el resto de la nafta se envía al enfriador E-105A y al tanque (TK-19) de tratamiento con sosa, pasando por reboso a su tanque de almacenamiento (TK-64), siempre que su destino sea para la producción de gasolina, de lo contrario se enviaría para el tanque de producción (TK-18) como reductor de viscosidad sin pasarla por dicho tratamiento. El agua es drenada a la zanja y los gases no condensables se envían junto a la nafta a tanque de producción.

El crudo reducido que sale del fondo de la T-101 es bombeado con la bomba P-109A, B o C, gobernada por un control de nivel ubicado en el fondo, y se muestra el flujo por un indicador de flujo F-112, llegando al horno F-102 donde se calienta hasta 370-409°C, en dependencia de la operación, vaporizándose parcialmente. En la zona de radiación del horno se puede introducir vapor de agua recalentado con vistas a evitar la formación de coque en los tubos del mismo.

Planta de Destilación al vacío

El producto pasa a la zona de alimentación de la torre T-102, entre los platos tres y cuatro, que se encuentra a una presión por debajo de la presión atmosférica ocurriendo el flasheo del producto. La torre T-102 está diseñada con veintisiete platos distribuidos de la siguiente manera:

Fondo	tres platos (plato perforado)
Zona de lavado	cinco platos (cuatro copas y una malla)
Zona rectificación	diecinueve platos (diecisiete válvulas y dos colectores)

En esta separación inicial los vapores ascienden en la torre y el líquido cae al fondo. El fondo de la torre mantiene su nivel con un lazo en el autómata (LIC-01), accionando la neumática existente en las bombas P-201 (A o B) y es bombeado a través de los intercambiadores E-203H siempre que no se utilice para plato cinco y E-203F donde le ceden calor al crudo inyectado a la parte atmosférica, posteriormente pasa al enfriador E-204A de donde una parte va al fondo de la torre T-102 como reflujo frío, con vistas a que la temperatura del fondo esté por debajo de 343°C, la otra parte se envía a asfalto o puede pasar por un mezclador donde se le adiciona queroseno, diésel o ambos para producir petróleo combustible, en dependencia de la operación.

El líquido que abandona el plato cinco es tomado por la bomba P-205A o B quien lo bombea, gobernado por el control de nivel (LIC-05) situado en el plato, a través del intercambiador E-203H, de donde una parte (de ser necesaria) es enviada a la succión de la bomba P-109, para ser reprocesado y el resto pasa al enfriador E-204E y posteriormente al tanque de petróleo combustible.

Existe la posibilidad de que el producto de plato cinco vaya directamente al enfriador sin necesidad de entrar al intercambiador, esto se logra sacando de línea el intercambiador por la parte de plato cinco, dando la posibilidad de alinear el mismo para utilizarlo con el fondo de vacío.

La primera extracción de producto es por el plato nueve que pasa al despojador T-203 donde es despojado de las fracciones ligeras con vapor de agua. El flujo de producto de la T-102 al despojador es gobernado por un lazo de control de nivel (LIC-03). De ahí lo toma la bomba P-203B o C en cuya descarga está montado el lazo de control de nivel del despojador (FIC-02) que gobierna la salida de producto.

Entre la descarga de la bomba y el control de nivel existe una línea que se utiliza para mantener un reflujo al plato maya, operándose manualmente y el resto es bombeado al intercambiador E-203G donde le cede calor al crudo, de ahí circula al enfriador E-204C pasando al manifold de donde puede ser enviado a los diferentes tanques de cortes de aceites, gasóleo de vacío.

La siguiente salida es por el plato trece, es tomado por la bomba P-204A y B bombeado al intercambiador E-203E y devuelto a la torre en el plato catorce. Existe la posibilidad de no utilizar el reflujo intermedio siempre que en la torre se trabaje con baja carga, dando la posibilidad de usar el intercambiador E-203E para el enfriamiento del diésel atmosférico.

La segunda extracción de producto es por el plato veinte, que pasa al despojador T-202, donde es despojado de las fracciones ligeras con vapor de agua. El flujo de producto de la T-102 al despojador es gobernado por un lazo de control de nivel (LIC-03).

De ahí lo toma la bomba P-203A o B en cuya descarga está montado al lazo de control de nivel del despojador (FIC-01) que gobierna la salida de producto, y es bombeado al intercambiador E-203D donde le cede calor al crudo, luego al enfriador E-204E pasando al manifold donde puede ser enviado a los diferentes tanques de cortes de aceites, gasóleo de vacío o como PCP.

Existe la posibilidad de usar como reflujo intermedio la salida del despojador T-202, retornándolo al plato catorce, gobernándolo por el sistema de control del reflujo intermedio (TIC-04).

La próxima salida es el reflujo al tope, el cual es un reflujo de intervalo. Se toma por el plato veinticuatro a través de la bomba P-202 (A o B) en cuya descarga tiene el control de cascada de temperatura (TIC-01) dejando pasar más o menos flujo por la línea del intercambiador E-203A, enfriador E-204B y tope (plato veintisiete) y el producto que pasa por el control de nivel del plato veinticuatro (LIC-02)(exceso) pasa a través del enfriador E-204F hacia una línea del manifold pudiendo tirarse a los distintos tanques de corte de aceite así como al diésel y al crudo en caso que no cumpla especificaciones. Todos los productos son extraídos por cajas de extracciones parciales.

Además, existen conexiones a la descarga de las bombas P-202A y B que permiten reflujar producto al plato inferior al 24 y la otra posibilidad es reflujar el producto del plato veinticuatro al fondo de la torre a través de la línea de reflujo frío. Los vapores no

condensados, el aire y el vapor de agua suministrado durante el proceso, pasan a los condensadores de tope E-201A, donde se condensan parcialmente.

El líquido formado pasa al tambor D-201 donde se separan los hidrocarburos del agua, el agua va al drenaje y los hidrocarburos son tomados por la bomba P-205B o C y enviados a la línea del exceso de reflujo, al diésel, al crudo o al TK-37.

Los vapores no condensados pasan al eyector primario donde son arrastrados por el vapor de agua mezclándose con él y pasan al segundo condensador E-202A, donde se condensa parte de ellos, de aquí los residuos son arrastrados por el eyector secundario para el condensador E-202B, los líquidos condensados en los condensadores E-202A y B pasan igualmente al tambor D-201, quedando el aire y un residuo de vapor los cuales antes de ser expulsados a la atmósfera reciben un tratamiento previo para eliminar el sulfuro de hidrógeno presente en estos gases.

El tratamiento consiste en pasar los gases de vacío a través del eyector uno inferior o el eyector dos superior, ambos de acción hidráulica, hasta el reactor TB uno inferior o TB dos superior, cada uno de ellos diseñado para contener sosa líquida con una concentración establecida en un rango de 20 a 30 %, ambos cuentan con conexión de agua y vapor, y ambos se encargan de la solución, pero solo se utiliza un sistema, cuando se agota la sosa en un reactor, se utiliza el otro, con su sistema correspondiente.

La sosa es bombeada por la bomba P-204A o P-204B hasta el reactor TB1 o TB2, una vez cargados los reactores se comienza a recircular la sosa para lograr el funcionamiento de los eyectores (el inferior o el superior), estos extraen los gases hasta el reactor. Aquí reacciona el sulfuro de hidrógeno y los demás gases se expulsan a la atmósfera a través de una chimenea que sale de los reactores.

Al reaccionar el sulfuro de hidrógeno con la sosa cáustica se forma una solución de hidrosulfuro de sodio la cual posteriormente se bombea a través de la bomba P-204A o P-204B hasta el tanque de almacenamiento. Una vez terminado el tratamiento se procede a la limpieza del equipamiento y las tuberías a través del suministro de agua y vapor, para eliminar las tupiciones (**producción, 2015**).

Anexo 3

Tabla 1.3. Áreas de riesgo de la refinería “Sergio Soto Valdés”

Áreas generales de riesgo	Unidades de proceso	Nodos
AR-1. Descarga de combustibles y desalado de crudos	Unidad 1. Descarga Crudo Matanzas (ferrocarril)	Nodo 1. Descarga Crudo Matanzas (ferrocarril) <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.
	Unidad 2. Descarga Crudo Matanzas (camiones cisterna)	Nodo 2. Descarga Crudo Matanzas (camiones cisterna) <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.
	Unidad 3. Desalado y almacenamiento de reposo Crudo Matanzas	Nodo 3. Adición de agua y demulsificante <u>Parámetros:</u> flujo, tiempo de dosificación de agua, concentración del demulsificante, nivel.
		Nodo 4. Lavado de crudo y almacenamiento de reposo. <u>Parámetros:</u> flujo, temperatura, tiempo de reposo, concentración, nivel. Nodo 4a. Alimentación de agua desde el TK 26 hasta el TK 31 <u>Parámetros:</u> nivel Nodo 4b. Vapor de calentamiento para el lecho de agua en el TK 31 <u>Parámetros:</u> flujo
	Unidad 4. Descarga Crudo Pina (camiones cisterna)	Nodo 5. Descarga Crudo Pina. <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.
	Unidad 5. Desalado y almacenamiento de reposo Crudo Pina (camiones cisterna)	Nodo 6. Adición de demulsificante. <u>Parámetros:</u> flujo, tiempo de dosificación de demulsificante, concentración del demulsificante, nivel.
		Nodo 7. Lavado de crudo y almacenamiento de reposo. <u>Parámetros:</u> flujo, temperatura, tiempo de reposo, concentración, nivel. Nodo 7a. Alimentación de agua desde el TK 26 hasta el TK 30 <u>Parámetros:</u> nivel Nodo 7b. Vapor de calentamiento para el lecho de agua en el TK 30 <u>Parámetros:</u> flujo
	Unidad 6. Descarga y almacenamiento de fuel oil (ferrocarril)	Nodo 8. Descarga y almacenamiento de fuel oil. <u>Parámetros:</u> flujo, temperatura, presión, nivel.
Unidad 7. Descarga y almacenamiento de combustibles claros (ferrocarril)	Nodo 9. Descarga y almacenamiento de combustibles claros (ferrocarril). <u>Parámetros:</u> flujo, presión, nivel	
Unidad 8. Descarga y almacenamiento de combustibles claros (camiones cisternas)	Nodo 10. Descarga y almacenamiento de combustibles claros (camiones cisternas). <u>Parámetros:</u> flujo, presión, nivel.	
AR-2. Planta de Destilación Atmosférica	Unidad 9. Sistema de inyecto de crudo a la planta	Nodo 11. Tratamiento al crudo con hidróxido de sodio-carbonato de calcio.

		<p><u>Parámetros:</u> Flujo de hidróxido de sodio-carbonato de calcio, concentración de hidróxido de sodio-carbonato de calcio, temperatura de hidróxido de sodio-carbonato de calcio, flujo de vapor, nivel solución.</p> <p><i>Nodo 11 a.</i> Preparación de la solución de hidróxido de sodio.</p> <p><u>Parámetros:</u> cantidad de hidróxido de sodio, cantidad de agua, flujo de vapor, temperatura, tiempo de agitación.</p> <p><i>Nodo 11 b.</i> Preparación de la solución de hidróxido de sodio-carbonato de calcio</p> <p><u>Parámetros:</u> cantidad de solución de hidróxido de sodio, de carbonato de calcio y de agua, tiempo de agitación.</p> <p><i>Nodo 12.</i> Inyector de crudo con bombas P-105 A y P-105 B.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura.</p>
	Unidad 10. Banco de intercambiadores de calor E-203 A, E-203 B, E-203 C, E-203 D, E-203 E, E-203 F, E-203 G, E-203 H)	<p><i>Nodo 13.</i> Banco de intercambiadores de calor E-203 A, E-203 B, E-203 C, E-203 D, E-203 E, E-203 F, E-203 G, E-203 H)</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura.</p>
	Unidad 11. Horno F-101	<p><i>Nodo 14.</i> Horno F-101.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo de crudo, temperatura de crudo, presión del crudo.</p> <p><i>Nodo 14 a.</i> Insumo de fuel oil al horno F-101</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.</p>
	Unidad 12. Torre de destilación atmosférica T-101	<p><i>Nodo 15.</i> Torre de destilación atmosférica T-101.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.</p>
	Unidad 13. Condensadores de nafta E-103A, E-103B, E-103C, E-103D	<p><i>Nodo 16.</i> Condensadores de nafta E-103A, E-103 B, E-103C, E-103D.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura.</p>
	Unidad 14. Tambor separador de nafta D-103	<p><i>Nodo 17.</i> Tambor separador de nafta D-103.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.</p>
	Unidad 15. Despojadores de queroseno T-102 y de diésel T-103	<p><i>Nodo 18.</i> Despojador de queroseno (T-102)</p> <p><i>Nodo 19.</i> Despojador de diésel (T-103)</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.</p>
	Unidad 16. Enfriadores (nafta E-105 A, queroseno E-103 B, diésel E-103 C)	<p><i>Nodo 20.</i> Enfriadores.</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura.</p>
AR-3. Planta de Destilación al vacío	Unidad 17. Horno F-102	<p><i>Nodo 21.</i> Horno F-102.</p> <p>Parámetro: Temperatura, presión, flujo</p> <p><i>Nodo 21 a.</i> Insumo de fuel oil al horno F-102</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel.</p>
	Unidad 18. Torre Destilación al Vacío T-102	<p><i>Nodo 22.</i> Torre DV T-102. Parámetro: Temperatura, presión, nivel, flujo.</p>

	<i>Unidad 19.</i> Condensadores de tope de vacío (E-201 A, E-202 A, E-202 B)	<i>Nodo 23.</i> Condensadores de vacío. Parámetro: Temperatura
	<i>Unidad 20.</i> Tambor separador D-201	<i>Nodo 24.</i> Tambor D-201 Parámetro: Temperatura, flujo, nivel
	<i>Unidad 21.</i> Despojadores T-203 de corte lateral transformador R3 y T-202 de corte lateral sigatoka o I-12, R2	<i>Nodo 25.</i> Despojador T-202 de corte lateral R3 <i>Nodo 26.</i> Despojador T-203 de corte R2 Parámetro: Flujo, nivel, temperatura, presión
	<i>Unidad 22.</i> Enfriadores (Asfalto E-204 A, reflujo al tope E-204 B, R2 E-204 C, plato 5 E-204 D, R3 E-204 E, plato 24 E-204 F)	<i>Nodo 27.</i> Enfriadores de vacío. Parámetro: Temperatura, flujo
AR-4. Planta de Aceites Básicos	<i>Unidad 23.</i> Llenado de la refinadora R-501	<i>Nodo 28.</i> Llenado de la refinadora R-501 <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel, % de agua en el aceite.
	<i>Unidad 24.</i> Refinación del aceite, con Ácido Sulfúrico.	<i>Nodo 29.</i> Refinadora para el tratamiento con ácido sulfúrico: R-501. Parámetro: Temperatura (del aceite), concentración (del ácido sulfúrico), tiempo agitación, flujo de aceite y de agua. <i>Nodo 29 a.</i> Adición de ácido sulfúrico. <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel. <i>Nodo 29 b.</i> Baño de arrastre <u>Parámetros:</u> flujo, presión, temperatura, nivel, tiempo
	<i>Unidad 25.</i> Neutralización, con Hidróxido de Sodio.	<i>Nodo 30.</i> Neutralizadora: N-501. Parámetro: Temperatura (del aceite), concentración (de hidróxido de sodio), tiempo, flujo
	<i>Unidad 26.</i> Lavado, con agua Industrial.	<i>Nodo 31.</i> Neutralizadora N-502. Parámetro: Temperatura (del aceite y del agua), tiempo de adición de agua, flujo de aire, tiempo de agitación.
	<i>Unidad 27.</i> Secado, con aire seco.	<i>Nodo 32.</i> Neutralizadora N-503. Parámetro: Temperatura, tiempo agitación.
	<i>Unidad 28.</i> Refinación con arcilla decolorante.	<i>Nodo 33.</i> Digestores para el tratamiento con arcilla decolorante: D-501 y D-502. Parámetro: Flujo, tiempo, vacío en el digestor, temperatura del aceite en el digestor.
	<i>Unidad 29.</i> Filtración	<i>Nodo 34.</i> Banco de filtros prensa: FP-501, FP-502, FP-503 y FP-504. Parámetro: Flujo, temperatura.
	<i>Unidad 30.</i> Adición de aditivo antioxidante. (solamente para el aceite Transformador).	<i>Nodo 35.</i> Adición de aditivo antioxidante. Parámetro: Tiempo, flujo
	<i>Unidad 31.</i> Envasado del aceite transformador en bidones	<i>Nodo 36.</i> Envasado del aceite transformador en bidones. Parámetros: Tiempo de secado con nitrógeno, flujo de aceite a secar, presión de nitrógeno. <i>Nodo 36a.</i> Envasado del aceite transformador en bidones. Parámetros: Presión de nitrógeno, tiempo de secado del bidón.

	<i>Unidad 32. Tratamiento al gudrón</i>	<i>Nodo 37. Tanque mezclador del gudrón ácido: M-500. Parámetros: Cantidad de sosa. Nodo 37a. Tanque de lavado de gudrón TK-10. Parámetros: Cantidad de agua, temperatura, tiempo de decantación</i>
AR-5. Sistema de tratamiento de residuales líquidos	<i>Unidad 33. Trampa Central</i>	<i>Nodo 38. Trampa Central. Parámetro: Flujo</i>
	<i>Unidad 34. Trampa destino final</i>	<i>Nodo 39. Trampa destino final. Parámetro: Flujo</i>
	<i>Unidad 35. Trampa del TK 46</i>	<i>Nodo 40. Trampa del TK 46. Parámetro: Flujo</i>
AR-6. Sistema de generación de vapor	<i>Unidad 36. Calderas B-604, B-605, B-606, B-607</i>	<i>Nodo 41. Caldera B-604. Parámetro: Presión, nivel, temperatura</i>
		<i>Nodo 42. Caldera B-605. Parámetro: Presión, nivel, temperatura</i>
		<i>Nodo 43. Caldera B-606. Parámetro: Presión, nivel, temperatura</i>
		<i>Nodo 44. Caldera B-607. Parámetro: Presión, nivel, temperatura</i>
	<i>Unidad 37. Tanque (TK) de insumo fuel oil</i>	<i>Nodo 45. Tanque de insumo fuel oil. Parámetro: Temperatura, presión, flujo</i>
AR-7. Almacenamiento de combustibles	<i>Unidad 38. Cubeto A (TK 47,62,63,65,66,67)</i>	<i>Nodo 46. Cubeto A (TK 47, 62, 63, 65, 66, 67). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 39. Cubeto B (TK 39, 40)</i>	<i>Nodo 47. Cubeto B (TK 39, 40). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 40. Cubeto C (TK 20, 52, 53)</i>	<i>Nodo 48. Cubeto C (TK 20, 52, 53). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 41. Cubeto D (TK 7, 12, 18)</i>	<i>Nodo 49. Cubeto D (TK 7, 12, 18). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 42. Cubeto E (TK 11, 9)</i>	<i>Nodo 50. Cubeto E (TK 11, 9). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 43. Cubeto F (TK 41, 42,43, 44)</i>	<i>Nodo 51. Cubeto F (TK 41, 43, 42, 44). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 44. Cubeto G (TK 54, 55, 56, 57, 48,49, 60, 61, 68)</i>	<i>Nodo 52. Cubeto G (TK 54, 55, 56, 57, 48,49, 60, 61, 68). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 45. Cubeto H (TK 45)</i>	<i>Nodo 53. Cubeto H (TK 45). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 46. Cubeto I (TK 13, 14, 21, 23, 37)</i>	<i>Nodo 54. Cubeto I (TK 13, 14, 21, 23, 37). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
	<i>Unidad 47. Cubeto J (TK 35, 19, 64, 29, 31, 38, 30, 24, 25, 26, 32)</i>	<i>Nodo 55. Cubeto J (TK 35, 19, 64, 29, 31, 38, 30, 24, 25, 26, 32). Parámetro: Temperatura, flujo</i>
<i>Unidad 48. Cubeto K (TK 50, 51)</i>	<i>Nodo 56. Cubeto K (TK 50, 51). Parámetro: Temperatura, flujo</i>	
AR-8. Laboratorio químico	<i>Unidad 49. Laboratorio químico</i>	<i>Nodo 57. Laboratorio químico</i>
AR-9. Mantenimiento	<i>Unidad 50. Mantenimiento</i>	<i>Nodo 58. Mantenimiento</i>
AR-10. Almacén de GLP	<i>Unidad 51. Almacén de GLP</i>	<i>Nodo 59. Almacén de GLP</i>
AR-11. Transcupet	<i>Unidad 52. Transcupet</i>	<i>Nodo 60. Transcupet</i>
AR-12. Cubalub	<i>Unidad 53. Cubalub</i>	<i>Nodo 61. Cubalub</i>

Anexo 3.1

Tabla 3.1. Principales factores de riesgo en el Horno F-101 (Fuente: Anexo XIII. HAZOP del Informe “Análisis de Riesgo Tecnológico” 2017)

No.	Desviación	Causas	Efectos/ Consecuencias	Salvaguardas/ Sistema de protección	Nivel de riesgo	Recomendaciones/ Actuación
281	Aumento de presión del crudo en la zona de convección del horno F-101 . (Nodo 14)	Obstrucciones en la línea a F-101 y en los tubos de las secciones, por mala calidad de la materia. Fallo de la bomba de inyector de crudo P-105 A/B .	Derrame de combustible en los intercambiadores, conexiones al F-101 y del sistema, pudiendo provocar un incendio . Daño a las propiedades físicas de los tubos del F-101 y de su estructura en general. Formación de coque en el interior de los tubos.	Manómetros en las secciones A y B de F-101 , se compara la diferencia de presión entre secciones. Termopares para fijar y verificar temperatura del horno F-101 . Alarma sonora y lumínica. Multipunto para control visual de temperatura en las dos zonas del horno. (termopares distribuidos a lo largo de la superficie del tubo)	<p>Consecuencias: Inadmisibles. Seguridad: Acceptable Medidas: Actuación inmediata.</p>	Tratamiento a la materia prima. Revisión y mantenimiento planificado. Parada de emergencia de F-101 . Instalar termocables e indicadores de flujo en la entrada y salida del horno. Capacitación y evaluación del operador.
287	Aumento de presión del crudo en la zona de radiación del horno F-101 . (Nodo 14)	Tupiciones en el banco de intercambiadores de calor. Rotura (caída de cuñas) de las válvulas. Error del operador.				
290	Bajo flujo de crudo a la salida del horno F-101 . (Nodo 14)	Obstrucciones en la línea a F-101 y en los tubos de las secciones, por mala calidad de la materia. Fallo de la bomba de inyector de crudo P-105 A/B . Tupiciones en el banco de intercambiadores de calor. Rotura (caída de cuñas) de las válvulas. Error del operador. Lecturas incorrectas de las mediciones. Fuga en el sistema (averías en tubos, platillos, rajaduras). Fallo de la instrumentación.	Aumento de temperatura en las zonas del F-101 , causando daños en la estructura de los tubos, deformaciones, deposición de sedimentos (roturas) en las paredes de los tubos (derrame - incendio)	Indicación de flujo de P-105 A/B . Indicación de temperatura y presión en las secciones de F-101 . Control automático de la temperatura del crudo. Multipunto para control visual de temperatura en las dos zonas del horno. (termopares distribuidos a lo largo de la superficie del tubo)		Evitar fallas en el suministro de crudo al horno. Mantenimiento planificado. Tratamiento a la materia prima. Parada de emergencia de F-101 . Instalar termocables e indicadores de flujo en la entrada y salida del horno. Capacitación y evaluación del operador.
292	Disminución de la presión del crudo a la salida del horno F-101 . (Nodo 14)					

Tabla 3.2. Principales factores de riesgo en la Torre T-101 (Fuente: Anexo XIII. HAZOP del Informe “Análisis de Riesgo Tecnológico” 2017)

No.	Desviación	Causas	Efectos/ Consecuencias	Salvaguardas/ Sistema de protección	Nivel de riesgo	Recomendaciones/ Actuación
330	Alta presión en el tope de la torre de destilación atmosférica T-101. (Nodo 15)	Obstrucción en línea de salida hacia los condensadores por fallo de la válvula de entrada a los condensadores o tupiciones dentro del condensador. Alta temperatura en T-101. Presencia de alto contenido de agua en el crudo de inyect. Fallo del lazo de control de presión en el tambor separador de nafta D-103. Fallo en el sistema de enfriamiento. Mal funcionamiento de la bomba de reflujo en tope P-101 A/B. Error del operador.	Aumento de la probabilidad de derrame , con las agravantes de incendio . Afectación en la calidad de los destilados. Se disparan las válvulas de seguridad provocando parada del proceso.	Control visual de presión en el tope de T-101. Análisis a la materia prima, crudo. Válvulas de seguridad en el tope T-101 y en el D-103. Válvula de control de flujo de vapor al fondo de T-101. (acción manual)	Consecuencias: Inadmisibles. Seguridad: Acceptable Medidas: Actuación inmediata.	Instalar sistema de control de nivel automático en D-103. Colocar indicador de flujo a la salida del reflujo al tope de T-101. Cumplimiento de los parámetros de calidad de la materia prima. Capacitación y evaluación del operador.
333	Bajo flujo del corte de nafta del tope de la torre de destilación atmosférica T-101 hacia condensadores. (Nodo 15)	Cierre de válvula por error operacional, fallo propio o tras un mantenimiento. Baja presión en T-101. Fugas en línea hasta los condensadores. Obstrucciones en condensadores. Composición del crudo, depende de API (ligereza). Obstrucción en los platos superiores de la torre. Error del operador	Bajo nivel, temperatura y presión en D-103. Variación del flujo hacia D-103, por tanto, de reflujo hacia T-101. Se afecta el control de temperatura en el tope de T-101, por tanto, el balance térmico de T-101, provoca mala calidad de los productos. Derrame , en presencia de fuentes de ignición, puede ocurrir incendio .	Control de presión en los condensadores y en D-103. Control de nivel en D-103.		Colocar indicador de flujo a la salida de T-101. Cumplir con el esquema de calibración de los instrumentos de medición y revisión periódica de los mismos. Capacitación y evaluación del operador.

Tabla 3.3. Principales factores de riesgo en el Horno F-102 (Fuente: Anexo XIII. HAZOP del Informe “Análisis de Riesgo Tecnológico” 2017)

No.	Desviación	Causas	Efectos/ Consecuencias	Salvaguardas/ Sistema de protección	Nivel de riesgo	Recomendaciones/ Actuación
479	Aumento de presión del crudo reducido en la zona de convección del horno F-102 . (Nodo 21)	Mala calidad de la materia prima, provoca obstrucciones en los tubos de las secciones de F-102 . Alto flujo de crudo reducido a la entrada de F-102 . Problemas con el funcionamiento de los lazos de control de flujo por fallo de aire en el control de la bomba de fondo de T-101 , P-109 A/C/D . Fallo de válvula a la salida del horno. Error del operador.	Derrame de combustible en conexiones a F-102 y del sistema, puede ocurrir un incendio . Daño a las propiedades físicas de los tubos del F-102 y de su estructura en general.	Control de presión a la entrada de F-102 y a la salida de P-109 A/C . Multipunto para control visual de temperatura en las dos zonas del horno. (termopares distribuidos a lo largo de la superficie del tubo)	Consecuencias: Inadmisibles . Seguridad: Aceptable Medidas: Actuación inmediata .	Colocar indicación de alta presión del flujo en el sistema de supervisión. Cumplir con el esquema de calibración de los instrumentos de medición y revisión periódica de los mismos. Tratamiento a la materia prima. Capacitación y evaluación del operador.
485	Aumento de la presión del crudo reducido en la zona de radiación del horno F-102 . (Nodo 21)					
482	Bajo flujo de crudo reducido en la zona de radiación del horno F-102 . (Nodo 21)	Tupición en la zona de convección. Tupición en la válvula de salida del fuel oil de T-101 . Cuña caída a la salida de T-101 . Problemas en la P-109 A/C (cavitación, tupición en el filtro o impelente, problemas mecánicos). Problemas en la neumática de fondo. Error del operador.	Aumento de temperatura en la salida del F-102 , causando daños en la estructura de los tubos, deformaciones, deposición de sedimentos (roturas) en las paredes de los tubos (derrame - incendio)	Control de temperatura en las secciones de F-102 . Control de nivel de T-101 . Multipunto para control visual de temperatura en las dos zonas del horno. (termopares distribuidos a lo largo de la superficie del tubo)		Colocar flujómetro en salida de T-101 hacia F-102 . Mantenimiento planificado. Capacitación y evaluación del operador.
488	Bajo flujo de crudo reducido a la salida del horno F-102 . (Nodo 21)					

Tabla 3.4. Principales factores de riesgo en la Torre T-102 (Fuente: Anexo XIII. HAZOP del Informe “Análisis de Riesgo Tecnológico” 2017)

No.	Desviación	Causas	Efectos/ Consecuencias	Salvaguardas/ Sistema de protección	Nivel de riesgo	Recomendaciones/ Actuación
513	Bajo flujo de crudo reducido a la zona de alimentación de la torre de destilación al vacío T-102 (Nodo 22)	Fugas en las tuberías hasta T-102 . Obstrucciones en la línea de crudo reducido. Problemas con P-109 A/C . Tupición del flujo en la zona de convección de F-102 . Tupición en la válvula de salida del fuel oil de la T-101 . Cuña caída a la salida de T-101 . Problemas en la P-109 A/C (cavitación, tupición en el filtro o impelente, problemas mecánicos). Problemas en la neumática de fondo. Error del operador.	Bajo nivel en el fondo de T-102 . Afectaciones al proceso productivo y la calidad de los productos. En caso de derrame en presencia de fuentes de ignición puede ocurrir incendio .	Control de temperatura de la zona de alimentación a T-102 . Control de presión en bomba de fondo de T-101 y F-102 .	<p>Consecuencias: Importantes. Seguridad: Aceptable. Medidas: a corto plazo.</p>	Colocar flujómetro en T-101 hacia F-102 . Mantenimiento planificado. Capacitación y evaluación del operador.
532	Disminución del vacío en la torre de destilación al vacío T-102 (Nodo 22)	Problemas en los eyectores de vacío. Exceso de vapor en el fondo de T-102 . Poros en las tuberías (succión). Alta temperatura en el agua de enfriamiento. Descontrol en T-101 puede provocar exceso de ligeros en T-102 . Error del operador.	Mala calidad de los productos de la T-102 . En caso de ocurrir haber succión en las tuberías de combustible en presencia de una fuente de ignición puede provocar un incendio .	Vacuómetros en el fondo, zona de alimentación y tope de T-102. Sensores de presión en el tope y la zona de alimentación que envía la señal al autómeta.		Mantenimiento planificado. Capacitación y evaluación del operador.
579	Bajo flujo del corte de diésel de vacío a la salida de los condensadores. (Nodo 23)	Mala condensación del diésel de vacío en los condensadores. Cierre de válvula por error operacional, fallo propio o tras un mantenimiento. Baja presión en el tope T-102 . Fugas en la línea hasta los condensadores. Obstrucciones en los condensadores. Composición del crudo reducido. Error del operador.	Bajo nivel, temperatura y presión en el tambor separador de diésel de vacío D-201 . Bajo rendimiento del corte de diésel de vacío. Puede degradarse el producto dentro de T-102 . En caso de derrame de combustible en presencia de fuentes de ignición puede ocurrir incendio .	Mampara en el tambor separador de diésel de vacío que permite separar el agua del producto.		Instalar sistema de control de nivel automático en D-201 . Cumplimiento de los parámetros de calidad de la materia prima. Mantenimiento planificado. Capacitación y evaluación del operador.

<p>637</p>	<p>Menor flujo de diésel de vacío a la salida del enfriador E-204 F (Nodo 27)</p>	<p>Obstrucción en el enfriador. Cuña caída a la entrada del enfriador. Fugas en la línea de diésel de vacío. Composición del crudo reducido que entra a la torre. (más o menos contenido de ligeros). Error del operador.</p>	<p>Menor flujo de diésel de vacío a tanque de producción. En caso de haber derrame de diésel de vacío y existir una fuente de ignición puede ocurrir un incendio.</p>	<p>No hay sistema de control.</p>	<p>Instalar sistema de control de nivel automático en D-201. Colocar flujómetro a la salida del enfriador E-204 F. Mantenimiento planificado. Capacitación y evaluación del operador.</p>
<p>673</p>	<p>Bajo flujo de crudo hacia el intercambiador de calor E-203 A (Nodo 27a)</p>	<p>Bajo nivel en tanques de almacenamiento de crudo. Problemas con el funcionamiento de P-105A/B. Mal funcionamiento del control automático de P-105A/B. Obstrucción en la línea de crudo. Tupición en el filtro de P-105A/B. Fugas en la línea de inyector o hacia el intercambiador. Error del operador.</p>	<p>Bajo flujo de crudo hacia P-105A/B e intercambiadores. Afectaciones al proceso productivo. En caso de tupición del filtro, disminuye la presión en P-105A/B. En caso de derrame de crudo en presencia de fuente de ignición puede ocurrir incendio.</p>	<p>Control automático a la salida de la bomba reciprocante. (Flujo). Manómetros a la salida de la P-105A/B. entrada y salida de cada intercambiador.</p>	<p>Colocar flujómetro a la entrada del intercambiador de calor. Mantenimiento planificado (calibración de instrumentos de medición). Continuidad de sistemas de tierra. Capacitación y evaluación del operador.</p>

En ficheros independientes se adjuntan nueve (9) anexos que complementan el informe de la investigación y que han sido referidos en su momento, en el desarrollo del trabajo y son los siguientes:

ANEXO 4.1 AFE DERRAME F-101 (*F-101A y F-101B*).

ANEXO 4.2 AFE DERRAME F-102 (*F-102 A y F-102 B*).

ANEXO 4.3 AFE DERRAME T-101 (*T-101 A y T-101B*).

ANEXO 4.4 AFE DERRAME T-102 (*T-102 A; T-102 B; T-102 C; T-102 D y T-102 E*).

ANEXO 4.5 AFE INCENDIO F-101.

ANEXO 4.6 AFE INCENDIO F-102.

ANEXO 4.7 AFE INCENDIO T-101.

ANEXO 4.8 AFE INCENDIO T-102.

ANEXO 5 RESULTADOS FINALES