

LOS ANALISIS HAZID Y HAZOP EN LA EVALUACIÓN FOMAL DE SEGURIDAD. PROPUESTAS DE MEJORA

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Daniel Sánchez Sánchez

Dirigido por:
Dr. Jaime Rodrigo de Larrucea

Grado en Nàutica y Transporte marítim

Barcelona, diciembre 2018

A Elena, Anna y Guillem, mi familia, por todo. A Jesús, Rubén y Pau por aguantarme.

A Jaime, por marcar el rumbo.

Índice

0.- Introducción	Pág. 1
0.1.- Contextualización del trabajo - La Evaluación Formal de Seguridad.....	Pág. 3
0.1.1.- Fase 1: Identificación de riesgos.....	Pág. 8
0.1.2.- Fase 2: Análisis de riesgos.....	Pág. 10
0.1.3.- Fases 3/4/5: La gestión del riesgo.....	Pág. 11
1.- HAZID (<i>Hazard Identification</i>). Identificación de Peligros.....	Pág. 13
1.1.- Definición.....	Pág. 14
1.2.- Introducción.....	Pág. 15
1.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto HAZID.....	Pág. 16
1.3.0.- Métodos de HAZID.....	Pág. 18
1.3.1.- Paso 1- Identificar.....	Pág. 20
1.3.2.- Paso 2- Proceso.....	Pág. 23
1.3.2.1.- Identificar el fenómeno.....	Pág. 24
1.3.2.2.- Comprender el fenómeno.....	Pág. 24
1.3.2.3.- Causa Raíz.....	Pág. 25
1.3.3.- Paso 3- Recomendaciones.....	Pág. 26
2.- HAZOP (<i>Hazard Operability</i>). Análisis de fiabilidad operativa.....	Pág. 29
2.1- Definición.....	Pág. 29
2.2.- Introducción.....	Pág. 30
2.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto HAZOP.....	Pág. 31
2.3.1.- Paso 1- Identificación de los sistemas.....	Pág. 35
2.3.2.- Paso 2- Análisis de los sistemas.....	Pág. 37
2.4.- Efectividad.....	Pág. 42

3.- AMFE. Análisis modal de fallos y efectos.....	Pág. 43
3.1.- Definición.....	Pág. 44
3.2.- Introducción.....	Pág. 44
3.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto AMFE.....	Pág. 46
3.3.1.- Fase Inicial.....	Pág. 48
3.3.2.- Fase mejora continua.....	Pág. 50
3.3.3.- El cálculo del Índice de Prioridad de Riesgo.....	Pág. 54
4.- FTA y ETA - Árbol de fallos y Árbol de eventos. El modelo <i>bow-tie</i>	Pág. 57
4.1.- Información necesaria.....	Pág. 58
4.2.- FTA - Fault Tree Analysis.....	Pág. 59
4.2.1.- Procedimiento de aplicación del FTA.....	Pág. 60
4.2.1.1.- Puertas lógicas.....	Pág. 61
4.2.1.2.- El diagrama de árbol.....	Pág. 65
4.3.- ETA - Event Tree Analysis.....	Pág. 68
4.3.1.- Procedimiento de aplicación del ETA.....	Pág. 69
4.3.1.1.- El diagrama de decisión.....	Pág. 70
4.3.1.2.- El Árbol de Eventos.....	Pág. 72
4.4.- El “ <i>bow-tie</i> ”.....	Pág. 73
5.- Conclusiones.....	Pág. 76
6.- Bibliografía.....	Pág. 81

LISTA ABREVIATURAS

EFS FSA –Evaluación Formal de Seguridad o *Formal Safety Assessment*

OMI IMO –Organización Marítima Internacional o International Maritime Organisation

HAZID- *Hazard Identification* (Estudio de Identificación de Riesgos)

HAZOP- *Hazard Operability* (Análisis de fiabilidad operativa)

MCA- *Maritime and Coastguard Agency* (Agencia Marítima y de Guardacostas del Reino Unido)

MSC- *Maritime Safety Comitee* (Comité de Seguridad Marítima)

MEPC- *Marine Environment Protection Committee* (Comité de protección del medio marino)

KPI- *Key Point Indicator* (Indicador de Punto Clave)

AFO- Análisis Funcional de Operatividad

AMFE FMEA Análisis Modal de Fallos y Efectos o *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA- *Failure Tree Analysis* (Análisis de Árbol de Fallos)

ETA- *Event Tree Analysis* (Análisis de Árbol de Eventos)

HAZAN- *Hazard Analysis* (Análisis de Riesgos)

RI- Riesgo Individual

RCO- *Risk Control Options* (Opciones de Control de Riesgos)

RCM- *Risk Control Measures* (Medidas de Control de Riesgos)

CAF- *Cost of Avoiding a Fatality* (Coste de Impedir una Fatalidad)

GCAF- *Gross Cost of Avoiding a Fatality* (Coste Bruto de Impedir una Fatalidad)

NCAF- *Net Cost of Avoiding a Fatality* (Coste Neto de Impedir una Fatalidad)

HSE- *Health - Safety - Enviroment* (Salud - Seguridad - Medio Ambiente)

HC- HidroCarburos

IPR- Índice de Prioridad de Riesgo

NPR- Número de Prioridad de Riesgo

NTP- Nota Técnica de Prevención

LISTA DE FIGURAS

Figura nº 1. Fases de un procedimiento de Evaluación Formal de Seguridad (fuente: OMI, MSC Circular 1023).

Figura nº 2 Diagrama completo de la evaluación formal de seguridad.

Figura nº3. Pasos de un HAZID.

Figura nº4. Fase inicial del HAZID, Identificación de los riesgos.

Figura nº5. Segunda fase del HAZID, Tormenta de ideas y estudio de escenarios.

Figura nº6. Fase final del HAZID, Recomendaciones.

Figura nº7. Esquema del proceso de un sistema de filtración de gases.

Figura nº8. Esquema del HAZOP de un sistema de filtración de gases.

Figura nº9. Esquema general de combustible y división en Proceso, Sistemas y Subsistemas.

Figura nº10. Diagrama de la Gestión total del Riesgo.

Figura nº11. Esquema de un AMFE.

Figura nº12. Partes de la fase inicial de un AMFE.

Figura nº13. Información necesaria para el AMFE.

Figura nº14. Partes de la fase de mejora continua de un AMFE.

Figura nº15. Diagrama de la Gestión total del Riesgo.

Figura nº16. Árbol de Fallos de un incendio.

Figura nº17. Árbol de Fallos de un incendio. Calculo.

Figura nº18. Ejemplo diagrama de decisión para una estrategia empresarial.

Figura nº19. Cálculo de probabilidades para el diagrama de decisión.

Figura nº20. Ejemplo de Árbol de Eventos para un incendio.

Figura nº21. Esquema para el modelo en pajarita, diferencias entre FTA y ETA.

LISTA DE TABLAS

Tabla nº 1. Índice de riesgo. Elaboración con datos de (MSC Circ. 1023), (Kontovas y Psaraftis, *Formal Safety Assessment: A Critical Review*, 2009).

Tabla nº2- *Guidewords* de un estudio HAZID- extraído de HAZID, Chilworth Technology Pvt Ltd. (CTPL).

Tabla nº3. Tabla de Severidad de los riesgos.

Tabla nº4. Tabla de Probabilidad de ocurrencia del riesgo.

Tabla nº5. Ejemplo de Una matriz de priorización de los riesgos.

Tabla nº6. Ejemplo palabras guía para un HAZOP.

Tabla nº7. Ejemplo palabras guía para el ejemplo HAZOP planteado .

Tabla nº8. Ejemplo Matriz de Riesgo para un HAZOP.

Tabla nº9. Ejemplo de una matriz de HAZOP.

Tabla nº10. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Gravedad del riesgo.

Tabla nº11. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Frecuencia del riesgo.

Tabla nº12. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Detectabilidad del riesgo.

Tabla nº13. Plantilla para la matriz de un AMFE.

Tabla nº14. Clasificación nodos lógicos.

Tabla nº15. Clasificación puertas lógicas Estáticas.

Tabla nº16. Clasificación puertas lógicas Dinámicas.

0. –Introducción

El Dr. Rodrigo de Larrucea y yo hablamos por primera vez de realizar este trabajo hará más de un año, por aquella época poco sabía de proyectos en cuanto a lo que seguridad marítima se refiere. Tardamos en comenzar el trabajo dado que yo estudio otra carrera simultáneamente y, en aquel momento, estaba trabajando también para una empresa italiana del sector del automóvil dedicado a la mejora continua de la calidad de los procesos en una planta de electrónica. El trabajo que realizaba en aquel momento comprendía el desarrollo de proyectos y el control de indicadores de todas las áreas de estudio de la planta: desde la eficiencia hasta la productividad.

Tampoco me imaginaba que todo aquello que aprendí en su día en aquella empresa fuera a tener tanto que ver con el trabajo del que luego hablaríamos Jaime y yo. Aún menos lo pensaba para mi segunda carrera, el grado en Matemáticas por la universidad de Barcelona. Mis asignaturas preferidas durante la carrera fueron las del campo del derecho y la seguridad marítima, así que acudí a él como un referente en ambos campos. Al ver la amplitud del tema me suscitó gran interés, y, al indagar un poco decidí aventurarme en este trabajo.

Al principio, dada mi situación de aquél momento la realización del trabajo final de Grado se me antojaba como un mero trámite para acreditar de una vez por todas alguna formación universitaria completa en mi currículum.

Desafortunadamente para mi planteamiento inicial y afortunadamente visto en perspectiva, el trabajo que me propuso Jaime iba a ir mucho más allá. Al darme cuenta de ello decidí posponer la realización del trabajo (teniendo siempre, pero, un ojo sobre él) hasta este cuatrimestre. Durante la realización de este he podido estudiar técnicas que, siendo primas hermanas de las que yo había utilizado en el sector de la automoción me han aportado amplias competencias en materia de conocimiento en el sector náutico. También pienso que yo he podido aportar algo gracias a mi visión de otros sectores distintos con un enfoque con un mismo objetivo, pero con un planteamiento totalmente diferente.

He disfrutado especialmente las partes del trabajo en el que he estudiado las herramientas cuantitativas usadas para el análisis de la seguridad marítima, pues me ha hecho darme cuenta que mi formación mixta en Náutica y Matemáticas es más necesaria y cotizada dentro del sector de lo que yo creía.

Escribo esta pequeña presentación cerca ya de acabar el trabajo, y aun teniendo en cuenta el tiempo que pasó desde que lo empezamos a plantear y los cambios conceptuales que este ha sufrido, me siento ya orgulloso del resultado que, sea cual fuera en términos puramente académicos, ya me ha aportado un amplio conocimiento en una parte muy específica de este sector donde mis intereses y formación se encuentran.

Relevancia de la EFS-FSA (Evaluación Formal de Seguridad)

De acuerdo con la Guía OMI (MSC Circular 1023), “*riesgo es la combinación de la frecuencia con la gravedad de la consecuencia*”. La gestión del riesgo reconoce y trata todos aquellos procesos que puedan suponer un perjuicio para una organización o para las personas relacionadas con estos directa o indirectamente, las vulnerabilidades que se dan en estos procesos para generar riesgo y la probabilidad de que las vulnerabilidades en el proceso causen daños.

Este trabajo se centrará en diversas técnicas de gestión del riesgo que se engloban dentro de los procedimientos de FSA. La OMI describe FSA como “*un proceso racional y sistemático para valorar los riesgos asociados a la actividad marítima y para evaluar los costes y beneficios de las opciones de la OMI en la reducción de dichos riesgos*”¹.

Durante el trabajo nos centraremos en evaluar dos procedimientos específicos: Estudio de riesgos y operatividad (HAZOP) e Identificación de peligros (HAZID). Se estudiará la aplicación de estas técnicas en diversos casos reales para extraer una metodología estándar para su aplicación, y también se definirán los puntos clave en la aplicación de estos procesos para maximizar sus resultados.

Cuando hablamos de técnicas de evaluación y gestión de riesgos nos referimos a aquellos procedimientos que se utilizan en actividades industriales para reducir accidentes mediante la aplicación de métodos preventivos y proactivos (herramientas de protección). Dentro de estas técnicas, a lo largo de este trabajo nos centraremos en la combinación de las dos herramientas denominadas Estudio de riesgos y operatividad (HAZOP) e Identificación de peligros (HAZID).

El primer objetivo de este trabajo será analizar diversas técnicas utilizadas dentro de los estudios HAZID y HAZOP para comprender en su totalidad un procedimiento FSA basado en estas herramientas. Después de haber analizado estas técnicas realizaremos una estandarización del flujo de un estudio HAZID y un estudio HAZOP para finalmente analizar la viabilidad y eficacia de estos métodos en algunos proyectos de instalaciones portuarias y marítimas.

Al ser metodologías muy abiertas, durante el trabajo nos centraremos a analizar estudios ya realizados en instalaciones de tipologías variadas para que los estándares definidos se puedan extender al mayor número de procesos posible para que pueda ser comprendido y aplicado por instalaciones marítimas y portuarias de cualquier tipología.

¹ Ver <http://www.imo.org/es/OurWork/Paginas/Home.aspx>

Después de comprender en su plenitud el HAZID y el HAZOP, técnicas de análisis putamente cualitativas, nos centraremos en analizar diversas técnicas cuantitativas para estudiar su integración dentro de los primeros, para así ampliar tanto los requerimientos como el alcance de los proyectos de gestión de la seguridad para instalaciones marítimas o portuarias.

La conclusión que se espera de este trabajo es demostrar no solo la viabilidad, sino también la importancia de utilizar técnicas de análisis avanzadas para la realización de proyectos de análisis de riesgo e incluir, como ya han hecho muchas industrias, en la industria marítima estas técnicas de análisis que permiten una gestión del riesgo proactiva y continua para desarrollar una cultura empresarial que vele por nuestra seguridad y la de todos nuestros compañeros marinos o trabajadores de nuestro mismo sector. En definitiva, crear una cultura de control total del riesgo para nuestro sector.

0.1.- Contextualización del Trabajo - La Evaluación Formal de Seguridad

Vista la temática y los objetivos del trabajo vamos a ver ahora en qué contexto se realiza en cuanto a la situación y el contexto en el que se engloba.

Para ello será interesante comenzar por una breve vista general de la historia de la seguridad marítima y tratar de dibujar luego un mapa de la situación actual de los estudios de seguridad en la industria marítima actualmente.

La Evaluación Formal de Seguridad, FSA o *Formal Safety Assessment* en inglés se desarrolla en primer lugar como respuesta a la catástrofe del Piper Alpha. En esa ocasión una plataforma petrolífera con ese mismo nombre explotó en el mar del Norte, llevándose la vida de 167 personas por delante. Después de ello, Lord Carver presentó un informe en el Parlamento, a lo que la MCA reaccionó proponiendo a la OMI una aproximación más profunda y con un enfoque más científico para la investigación de accidentes marítimos. La OMI da respuesta a esta petición mediante la Resolución MSC 62, que da lugar a una primera guía para esta investigación en 1997 y después de un periodo de estudio y perfeccionamiento, en 2002 surge la versión definitiva (que se sigue utilizando hoy en día. Se plantea una perspectiva de una gestión proactiva de la seguridad marítima estudiando las condiciones previas al siniestro. Dicha guía actual se conoce cómo *Guidelines for formal safety assessment for use in the IMO Rule-Making Process* (MSC Circular 1023 y MEPC Circular 392, 5, abril de 2002).

Finalmente se aprueban en el año 2005 por la OMI las enmiendas a estas guías sobre la FSA junto con la creación de nuevas normas de la OMI. Estas guías se enmiendan parcialmente en el mismo 2005 *MSC/Circular1180-MEPC/Circular474*, y finalmente en el año 2006: *MSC-MEPC.2/Circular5*.

Citando al Dr. Rodrigo de Larrucea:²

“La OMI describe la EFS como una metodología estructurada y sistemática, con el objetivo de reforzar la seguridad marítima, incluyendo la protección de la vida humana, salud, el medioambiente marino y la propiedad, mediante el uso del análisis de riesgos y la valoración del coste de sus beneficios. Además, la EFS es utilizada como instrumento de evaluación de las nuevas regulaciones de seguridad marítima y de protección del medioambiente marino o en la comparación entre reglas existentes y las posibles reglas mejoradas.”

El objetivo final de este enfoque es entonces, que la EFS no sea sólo un método de prevención para accidentes marítimos, sino también un método de análisis para la gestión de la seguridad marítima y una herramienta para clasificar y comprender los riesgos derivados de las operaciones marítimas y de las instalaciones. Esto es que la información de estos análisis realmente futuros proyectos para robustecer los puntos débiles que puedan llevar a que se produzcan dichos siniestros directamente en las fases de diseño. Se podría separar este objetivo en 3 puntos principales pues:

- Análisis de riesgos (*risk analysis*): Identificar los peligros del proyecto y estimar el riesgo para la seguridad de las personas, de los bienes involucrados o del medio ambiente.
- Evaluación de riesgos (*risk assessment*): Clasificar estos riesgos según sean asumibles/aceptables o si requieren de contramedidas. Esta parte se basa en comparar con los estándares de la industria o con otros proyectos en los que se hayan identificado riesgos parecidos. Un estudio más profundo puede ser requerido en este punto.
- Gestión de riesgos (*risk management*): Es el uso de la información extraída del análisis y evaluación del riesgo para tomar decisiones que reduzcan el riesgo mediante las contramedidas adecuadas y el estudio y posible implementación de ellas.

² RODRIGO DE LARRUCEA J. (2017): *El análisis y la gestión del riesgo a partir de la Evaluación Formal de la Seguridad (EFS/FSA): un nuevo modelo de seguridad portuaria.*

Los agentes encargados de aplicar las EFS, según las directrices de la OMI:³ “la metodología de la evaluación formal de seguridad puede ser aplicada por:

- *Un Estado miembro o una organización que tenga carácter consultivo ante la OMI cuando se propongan enmiendas a instrumentos de la OMI relacionados con la seguridad marítima y la prevención de la contaminación y la lucha contra ésta, a fin de analizar las consecuencias de dichas propuestas; o*
- *Un Comité o un órgano auxiliar designado, a fin de que aporte un criterio equilibrado en el marco general reglamentario para establecer las prioridades y los aspectos de interés y analizar los beneficios y las consecuencias de los cambios propuestos”.*

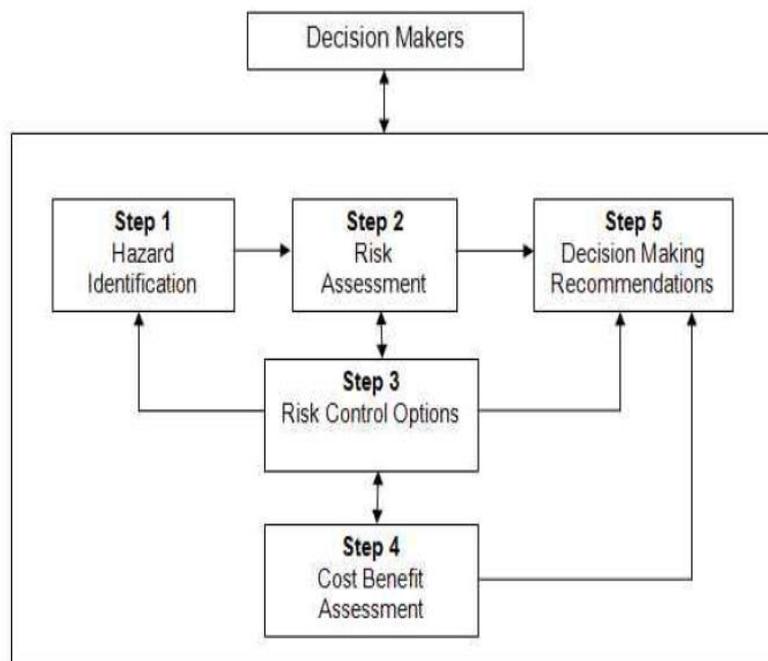


Figura nº 1. Fases de un procedimiento de Evaluación Formal de Seguridad (fuente: OMI, MSC Circular 1023).

Hay 5 pasos principales dentro de la EFS que se muestran en la figura nº 1:

³ Recoge: OMI Ref.: T1/3.02 MSC/Circ.1023 T5/1.01 MEPC

- 1- Identificación de riesgos: Se detallan todas las debilidades para la seguridad, qué podría ir mal o qué fue mal en el caso de que se esté aplicando con la instalación en funcionamiento.
- 2- Análisis de riesgos, frecuencias, posibilidades y consecuencias: Se estudian cuáles son la frecuencia, probabilidad y magnitud de la ocurrencia de cada uno de los riesgos identificados.
- 3- Identificación de opciones de control del riesgo: Cómo se pueden mejorar las cosas para evitar que ocurra cada uno de estos riesgos o qué se debería haber hecho para mejorar la situación en un pasado.
- 4- Evaluación del coste de los beneficios: Cuánto cuesta y cuánto se mejora cada uno de esos riesgos.
- 5- Recomendaciones: Cuales de todas esas acciones vale la pena iniciar.

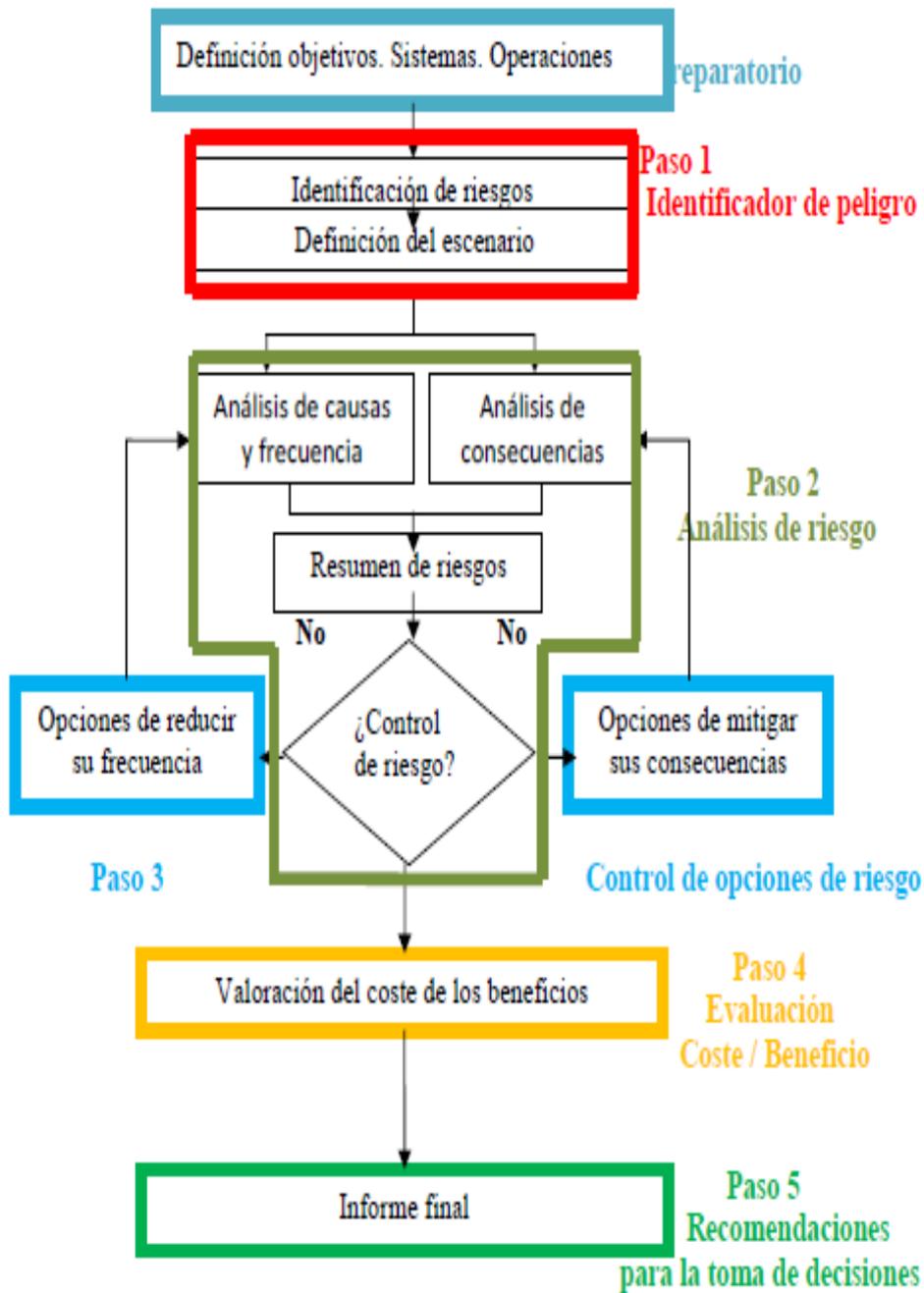


Figura nº 2 Diagrama completo de la evaluación formal de seguridad

Durante este trabajo nos vamos a focalizar en analizar y comprender las herramientas clave en las dos primeras fases de estos proyectos. A continuación, expondremos los objetivos de cada una de estas con más profundidad para, después de ello si, terminar de comprender todo lo necesario para comenzar nuestro estudio.

0.1.1.- Fase 1: Identificación de riesgos

El objetivo de esta fase inicial del proyecto será armar una lista de ítems y un esquema de los sistemas que vamos a estudiar durante el proyecto de gestión de la seguridad. Para ello será muy útil contar con información actualizada de bases de datos que recojan datos históricos referentes a proyectos similares y de las bases de datos para la investigación de accidentes marítimos.

A parte de estos datos históricos también será interesante que el equipo considere todos los posibles escenarios que se puedan dar para identificar un número mayor de peligros potenciales, y así hacer un análisis más completo que asegure un sistema más robusto al acabar todo el proceso.

Es en esta primera fase, dónde tienen más relevancia las herramientas sobre las cuales se centrará este trabajo: el HAZID (*Hazard Identification*) y el HAZOP (*Hazard Operability*). Uno de los objetivos que pretendemos con este trabajo es tratar de mejorar los resultados obtenidos de la aplicación de estas herramientas estudiando otras que se utilicen en contextos similares. Estas dos herramientas que a lo largo del trabajo conoceremos con más profundidad componen lo que conoceremos como el Análisis Funcional de Operatividad (AFO), que es esa parte anteriormente comentada de chequeo de los sistemas y su desempeño.

Hemos de tener en cuenta que en estas primeras fases predominan fuertemente las herramientas de tipo cualitativo para el análisis, como son las dos anteriormente comentadas, ya que las herramientas cualitativas (es decir, el análisis de datos históricos o del mismo proyecto) no garantizan el objetivo que pretende la OMI con estos estándares, es decir, la gestión proactiva del riesgo, ya que no contemplan situaciones que no se hayan dado con anterioridad. No obstante, debemos tener en cuenta, y lo veremos durante el trabajo, que, con la mejora en los últimos años de las técnicas de análisis de datos para la predicción, las inteligencias artificiales, etc... Es de esperar que el desarrollo de los proyectos de análisis e identificación de riesgo se desplacen hacia el uso de herramientas analíticas mucho más sofisticadas.

Como alternativa, hasta que no sea viable este cambio de paradigma, los modelos de probabilidad de eventos y la creación de escenarios ficticios que se pudieran dar son en estos momentos una medida de gran importancia.

En última instancia el resultado de estas herramientas serán diversos indicadores que clasificarán cada uno de los riesgos detectados durante esta fase, estos son:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Índice de Riesgo} = \text{Índice de Frecuencia} + \text{Índice de Gravedad}$$

Donde Probabilidad es la probabilidad de que ocurra una de las situaciones contempladas y la consecuencia es el posible daño que esta pudiera ocasionar en caso de darse.

Estos potenciales riesgos con sus respectivos indicadores se expondrán en la Matriz de Riesgo. Esta herramienta consiste en una matriz en la cual se categorizarán según la frecuencia y las consecuencias cada uno de los peligros. Esto categorizará los peligros detectados para la posterior priorización de su evaluación (la segunda fase, análisis de riesgos).

A continuación, la matriz de riesgo con los significados de cada uno de los indicadores:

		IG			
		1	2	3	4
IF	Frecuencia \ Gravedad	Menor	Significante	Grave	Catastrófico
	7	Frecuente	8	9	10
6	7		8	9	10
5	Razonablemente probable	6	7	8	9
4	Remoto	5	6	7	8
3		4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	Extremadamente remoto	2	3	4	5

Tabla nº 1. Índice de riesgo. Elaboración con datos de (MSC Circ. 1023), (Kontovas y Psaraftis, 2009, *Formal Safety Assessment: A Critical Review*)⁴

⁴ Ver RODRIGO DE LARRUCEA J. (2018) *La investigación en seguridad. Del Titanic a la Ingeniería de la Resiliencia*; (2015) *Seguridad Marítima. Teoría general del riesgo*.

0.1.2.- Fase 2: Análisis de riesgos

Una vez hemos identificado y priorizado cuales son los riesgos que debemos estudiar, entramos en los análisis en profundidad para cada uno de ellos. En esta fase se llenará el posible vacío analítico durante la primera fase centrado el estudio de los peligros mediante 2 herramientas cuantitativas: El FTA (*Fault Tree Analysis*) y el ETA (*Event Tree Analysis*). También estudiaremos durante el trabajo estas dos herramientas para analizar cómo mejorar la interacción entre estas dos primeras fases del proyecto de la Evaluación Formal de Seguridad. Serán pues estas herramientas utilizadas en la EFS el foco de estudio de este trabajo y el objetivo, ahora sí que podemos definir claramente, será la búsqueda de oportunidades de mejora en la aplicación de estas.

Sin entrar en mayor detalle sobre estas herramientas, en esta fase del proyecto nos centraremos en analizar cuáles son todos los precedentes para la ocurrencia de los peligros que hemos identificado y como se desarrollan las consecuencias de estos. En función de lo cual se desarrollarán las siguientes fases de la EFS, puesto que mediante este análisis seremos capaces de discernir cuales son los puntos más relevantes para evitar los riesgos de cada uno de los peligros estudiados, y, por lo tanto, seremos capaces de discernir si debemos atacar estos problemas conteniendo las consecuencias, detectando sus precedentes o diseñando nuevas salvaguardas que eviten que estos ocurran.

Para mostrar los resultados de esta fase, se extraerá en particular un indicador para cada uno de los riesgos, este indicador es el *riesgo individual* (RI), que es el riesgo de muerte, de lesión o perjuicios que experimenta un individuo en una localización/situación concreta. Esto es cómo se vería afectada cada una de las personas en caso de que ocurra uno de los peligros estudiados. El riesgo individual para un peligro se determina por el RI de la persona más expuesta a este, normalmente el indicador de riesgo que se tiene en cuenta para ello es el riesgo de fatalidad o muerte. Le calcula mediante la Frecuencia, la Probabilidad de el riesgo considerado (ej. Muerte) y la Exposición en forma de porcentaje a ese riesgo.⁵

$$RI = Frec \times Probab \times Exp$$

⁵ Ver *La investigación en seguridad*, op. Cit. Pág.90

0.1.3.- Fases 3/4/5: La gestión del riesgo

Después de estas fases que vamos a estudiar durante el proyecto y las conclusiones extraídas de cada una de ellas, los mismos equipos de trabajo que han desarrollado estos estudios emiten una serie de recomendaciones y propuestas para la mejora de los puntos débiles detectados, este punto comprendería la fase 3. Se deberá demostrar que la mitigación que supone la aplicación de estas contramedidas es suficiente para evitar que se reproduzca el peligro atacado. A estas contramedidas las llamaremos RCO's (*Risk Control Options*), y según las directrices del FSA que propone la OMI:

“Proponer unas opciones de control del riesgo (Risk Control Options, RCO's) efectivas y prácticas que comprendan las siguientes cuatro fases:

- Focalizarse en las áreas de riesgo que necesitan control,*
- Identificar las medidas de control de los riesgos potenciales (Risk Control Measures, RCM's),*
- Evaluar la efectividad de las medidas de control de los riesgos potenciales para disminuir el riesgo volviendo a evaluar el paso 2; y*
- Agrupar las medidas de control de los riesgos potenciales en opciones regulatorias prácticas.”*

A continuación, en la Fase 4: El análisis de coste se plantea la viabilidad de la aplicación de cada una de estas medidas, esto es comparar el coste y la efectividad de cada uno de los RCO destacados en la fase anterior. Este estudio se llevará a cabo mediante al uso de diversos indicadores. Actualmente el indicador que se utiliza para ello en la mayoría de los proyectos es el CAF o *Cost of Avoiding a Fatality*. Hay dos maneras de expresar este coste: Bruto y Neto. Estos se calculan de la siguiente manera:

-Coste Bruto de Evitar una Fatalidad o GCAF (del inglés *Gross Cost of Avoiding a Fatality*):

$$GCAF = \frac{C}{VR}$$

-Coste Neto para Evitar una Fatalidad o NCAF (del inglés *Net Cost of Avoiding a Fatality*):

$$NCAF = \frac{C - B}{\nabla R}$$

C se refiere al Coste de implementación de esta medida, B al Beneficio que se extrae de ello y ∇R la reducción de riesgo que supone la medida en términos de número de fatalidades.

El criterio que se utiliza actualmente para discernir la viabilidad de estas medidas es el criterio de los 3 millones de dólares. Según el cual la implementación de un RCO es viable siempre y cuando el coste neto para evitar UNA fatalidad sea de 3 millones de dólares, es decir $NCAF = \frac{C-B}{\nabla R} < \$3m$.

Finalmente, y para el último paso de la EFS: La toma de decisiones, que simplemente será la selección de estas posibles medidas en función de su viabilidad como hemos visto hasta ahora y el desarrollo de los proyectos para su implementación.

Empecemos ahora que tenemos una idea general de todas las fases de un EFS con el análisis de las herramientas que utilizamos para llevarlo a cabo.

1. -HAZID (*Hazard Identification*). Identificación de Peligros.

El objetivo de HAZID es proporcionar información para el posterior análisis de riesgos que se realizará para el medio ambiente, la salud y la seguridad. La aplicación del HAZID es una parte muy importante para el objetivo general de gestión del riesgo, ya que la información que se extraerá de esta será la base para el posterior análisis de la seguridad que se realizará con el método HAZOP. El valor añadido que aporta el HAZID es que facilita la focalización del análisis de riesgos, permitiendo comprender la naturaleza de los peligros existentes. El informe HAZID también proporciona una valiosa aportación al proceso de diseño basado en el riesgo (*Risk Based Design*), que nos permitirá minimizar o eliminar los riesgos que se identifican en HAZID/HAZOP en la fase de diseño de futuros proyectos. Las recomendaciones se basan en los hallazgos para mejorar la instalación y mejorar y hacer que el lugar de trabajo sea más seguro.

Para comenzar con el flujo de los procedimientos que se aplicarán dentro del FSA en una instalación marítima o portuaria que hemos definido durante la introducción comenzaremos por HAZID, ya que este será el primer paso en un proyecto de análisis y gestión del riesgo.

El Estudio de identificación de peligros (HAZID) divide un proceso en partes y componentes para un análisis detallado, identificando los puntos del proceso que pueden causar riesgos para la seguridad del personal de la instalación analizada.

Para realizar un HAZID se deberá diseñar una jerarquía de control de la instalación, que será la base para el posterior análisis que se realizará. La jerarquía de control es el método para controlar el proceso durante las fases tempranas. Esto es que para la correcta aplicación de HAZID se deberán utilizar herramientas que midan diferentes parámetros del proceso para definir un método de control definitivo que asegure la mitigación total o parcial de los riesgos que se generen durante el proceso. El objetivo será diseñar un sistema que genere diversos KPI's (*Key Point Indicators*) que serán los indicadores que se deberán controlar para garantizar la seguridad del proceso final.

Estas jerarquías de control serán definidas por la empresa que diseña la instalación o por la empresa encargada de realizar el HAZID.

1.1.-Definición

Visto que el objetivo del trabajo es crear un estándar para la industria marítima de la aplicación de estas técnicas, tomaremos como referencia para presentar el HAZID la definición propuesta por Bureau Veritas, empresa que ya ofrece servicios de esta clase para la industria marítima:⁶

“El estudio HAZID se basa en una herramienta de identificación de riesgos integrada en el proyecto en el momento en que se dispone de los diagramas de flujo de procesos, los borradores de los balances de masa y temperatura y las hojas de planos.

También es necesaria la recopilación de información sobre datos geotécnicos, ambientales y de infraestructuras existentes, ya que constituyen una fuente de riesgos externos. El método consiste en una herramienta de diseño que ayuda a organizar los informes HSE en un proyecto. La “Técnica de tormenta de ideas” normalmente conlleva la participación del personal de ingeniería, gestión de proyectos, mantenimiento y operaciones del cliente y del diseñador. Las principales averiguaciones y calificaciones de riesgos permiten cumplir con los requisitos HSE, y forman parte del Registro de Riesgos del proyecto que suelen solicitar las autoridades responsables de la concesión de licencias.

Principales ventajas

Un estudio HAZID bien organizado supondrá la correcta identificación de riesgos y precauciones en una fase temprana del diseño de una instalación. Nuestro equipo garantiza que:

- Se identifican los riesgos HSE a comienzos del proyecto, antes de incurrir en importantes gastos*
- Se registran y solventan los riesgos para poder evitarlos, mitigarlos o ponerlos de relieve durante el diseño*
- Las soluciones serán auditables de cara a inspecciones legislativas y de gestión*

⁶ Ver <http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazid-estudiosidentificacionriesgos>

- *Se evitan los retrasos de diseño o construcción y los aumentos del presupuesto*
- *Se reduce el número de riesgos sin descubrir durante el mantenimiento y la operación de la planta”*

1.2.- Introducción

El estudio HAZID es una herramienta que se basa en el uso de varias técnicas de análisis cualitativas que serán diferentes de un proyecto a otro para adaptarse a los métodos de trabajo de cada instalación en concreto. El método HAZID se aplica durante las fases tempranas de un proyecto de diseño de algún proceso o instalación. Como hemos visto en la definición de Bureau Veritas los objetivos de la aplicación de este método son:

- Identificar los riesgos HSE a comienzos del proyecto, antes de incurrir en importantes gastos.
- Registrar y solventar los riesgos para poder evitarlos, mitigarlos o ponerlos de relieve durante el diseño.
- Proponer soluciones que serán auditables de cara a inspecciones legislativas y de gestión.
- Evitar retrasos de diseño o construcción, así como posibles aumentos de presupuesto.
- Reducir el número de riesgos sin descubrir durante el mantenimiento y la operación de la planta.

Como veremos luego cuando estudiemos el método del HAZOP, la situación ideal para controlar totalmente los riesgos que puedan incurrir en un proyecto para una instalación será la aplicación previa de un HAZID para identificar todos los riesgos potenciales que puedan surgir en la instalación y diseñar un método de control óptimo que permita evitar su ocurrencia, y, posteriormente, realizar regularmente estudios HAZOP para identificar las variaciones de los parámetros de control y con ello los posibles riesgos que derivan del funcionamiento de la instalación y eliminarlos.

1.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto HAZID

Vamos a intentar ahora explicar cuál es el flujo usual dentro de un proyecto HAZID, y a continuación nos focalizaremos en las herramientas y técnicas que conforman este flujo para intentar, como buscábamos desde el principio definir una propuesta para una metodología estándar para su aplicación.

El flujo usual de un proyecto HAZID se explica en el siguiente diagrama:

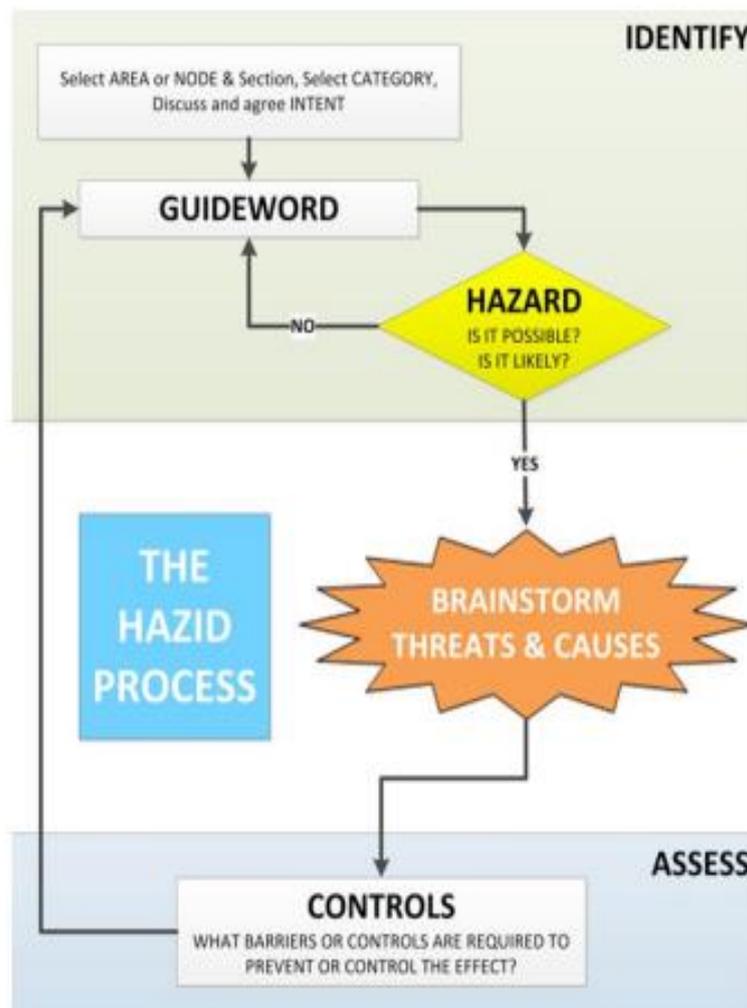


Figura nº3. Pasos de un HAZID ⁷

⁷ Ver http://www.halliburton.com/public/project_management/contents/Data_Sheets/web/H011228.pdf

En primer lugar, se divide el proceso en áreas y nodos. Las áreas son partes del proceso que cumplen una función concreta y los nodos son partes que realizan una tarea determinada dentro de esta área.

Pongamos un ejemplo: El área de ensamblaje de un producto, que consiste en montar y atornillar diversas piezas entre sí. Sus nodos serían: el proceso de atornillado, el proceso de montaje, ...

En el punto 1.0 hemos hablado de la Jerarquía de Control, en este documento se incluirán todos los riesgos potenciales ligados al nodo que estamos estudiando en ese momento. En ese momento se realizará un *checklist* en el que nos preguntaremos si es posible que estos riesgos ocurran.

Para los riesgos que se consideren como probables se realizará un *Brainstorming* para identificar todas las debilidades del diseño que puedan provocarlos. Una vez identificadas estas debilidades se chequea que el sistema de control identifique la variación en los parámetros del proceso que puedan provocar esos riesgos. En definitiva, que el sistema de control sea capaz de identificar o predecir la ocurrencia de estos posibles riesgos.

Con este objetivo, el último paso del HAZID será: si el sistema presenta debilidades se diseñarán nuevos métodos de control o se robustecerán los existentes.

El punto de estudio más relevante dentro de la metodología del HAZID serán los métodos de control y de análisis que se utilicen durante el proyecto. Así no solo será muy importante para su buena aplicación el contar con un grupo de expertos en las diferentes partes del proceso estudiado, sino también contar con un experto en las diferentes técnicas cualitativas para el análisis de los parámetros pertinentes en cada una de estas partes y uno en los métodos de control que se vayan a utilizar. Los estudios HAZID son muy distintos entre sí, pues estas técnicas de control y análisis serán diferentes para cada proyecto que vayamos a estudiar. Durante esta parte del trabajo intentaremos recoger las herramientas más importantes y utilizadas de este método de estudio y luego trataremos estandarizar un flujo de trabajo para la realización de un proyecto HAZID tomando diferentes ejemplos con las herramientas que vamos a analizar.

1.3.0.- Métodos de HAZID

El equipo multidisciplinario realiza el HAZID: personal del propietario, personal de la instalación y el presidente del estudio y el escriba del equipo de consultoría para garantizar que la revisión de HAZID sea exhaustiva. Los elementos de acción acordados se registraron en las hojas de trabajo HAZID.

Los diversos dibujos y documentos de apoyo se mencionaron como apropiados. El estudio progresó a través de los siguientes pasos:

- La intención del diseño y las condiciones normales de operación del área;
- Identificar las posibles causas y consecuencias del peligro. Un peligro puede considerarse "significativo" si tiene una causa creíble y puede tener consecuencias perjudiciales;
- Identificar las salvaguardas, mitigaciones y medidas de control existentes incluidas en el diseño;
- Llevar a cabo una clasificación de los riesgos en función de su seguridad o impactos ambientales; y
- Identificar recomendaciones y partes de acción si se requiere una mayor mitigación.

A continuación, mostramos un ejemplo reducido de los *guidewords* de un proyecto, serán estos los que desarrollaremos para ejemplificar el flujo de un proyecto. Las *guidewords* son la columna vertebral sobre la cual se desarrollará el HAZID. Son las partes del proceso que vamos a considerar dentro del estudio de riesgos.

Las *Guide Words* o palabras guía serán una acotación en la manera de clasificar las posibles situaciones que estudiaremos durante el HAZID. Al ser este un estudio cualitativo, será muy importante la definición de estas para acotar los resultados y forzar que los informes de los equipos dedicados al análisis de cada una de las áreas distintas sean comparables entre sí en tanto que valoren parámetros similares. A continuación, un ejemplo que dejará más claro cómo se componen estas:

S.No	Hazard Guideword
1	Un-ignited HC Release
2	Ignition of uncontrolled HC Release – Fire
3	Ignited HC Release – Explosion
4	Toxic exposure
5	High Pressure
6	High / Low temperature
7	Dropped Object
8	Maintenance
9	Confined Space (entry into tanks / vessels for inspection & maintenance)
10	Hazards due to improper Access / Egress / Escape / Evacuation.
11	Extreme weather
12	Radioactivity
13	Explosives
14	Sabotage / Piracy / Acts or Terrorism / Theft.
15	Electrical Hazards / HAC
16	Effluent disposal
17	Others

Tabla n°2- Guidewords de un estudio HAZID- extraído de HAZID, Chilworth Technology Pvt Ltd. (CTPL) ⁸

⁸ Ver

https://www.researchgate.net/publication/319979143_Risk_Management_Techniques_HAZOP_HAZID_Study

1.3.1.- Paso 1- Identificación

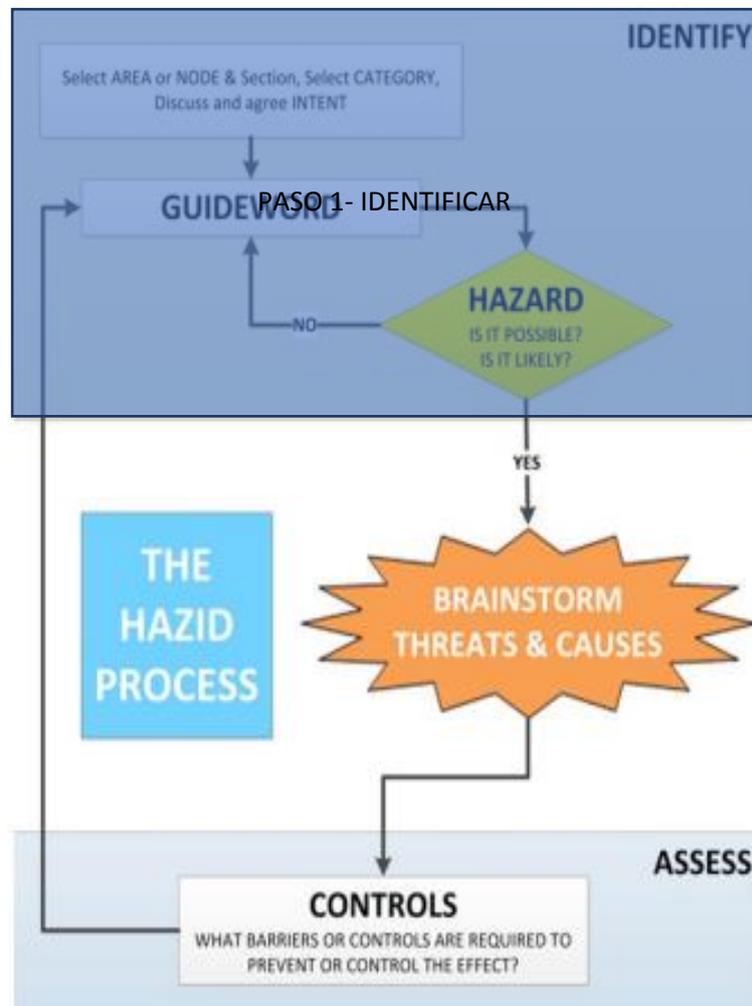


Figura nº4. Fase inicial del HAZID, Identificación de los riesgos⁹

Una vez identificadas estas *guidewords* se creará un equipo multidisciplinar que conozca los diferentes fenómenos a considerar. Por ejemplo: el punto 2 de estas *guidelines* es que se produzca un incendio causado por la fuga de un hidrocarburo. El escenario ideal sería contar como parte del equipo con una persona que conozca la instalación de hidrocarburos y una en operaciones contra-incendios.

⁹ Ver http://www.halliburton.com/public/project_management/contents/Data_Sheets/web/H011228.pdf

Una vez se ha designado este equipo, este definirá los riesgos potenciales y las consecuencias de cada una de las *guidewords*. Y se enumerarán los métodos de control considerados en el diseño para evitar la ocurrencia de estos fenómenos. Esta información conformará la matriz básica que necesitamos para llevar a cabo un estudio HAZID.

Una vez conformada la matriz con toda la información necesaria el equipo clasificará la gravedad de los riesgos identificados y la probabilidad de que estos ocurran basándose en los controles existentes. La clasificación de la gravedad de los riesgos estándar es la que se muestra en la siguiente tabla:

Consequence Table	
Consequence Class	Qualitative Employee Safety Consequence Criteria
1	No employee injuries
2	One Loss Time Injury or Illness
3	Multiple Lost Time Injuries or Illnesses
4	Multiple Lost Time Injuries or Illnesses w/one or more fatalities

Tabla n°3. Tabla de Severidad de los riesgos

La clasificación de la probabilidad de ocurrencia de los riesgos estándar, por otro lado, es la siguiente:

Likelihood Table	
Likelihood Class	Qualitative Likelihood Criteria
1	Not expected to occur during the lifetime of the process. Examples – Simultaneous failures of two or more independent instrument or mechanical systems
2	Expected to occur only a few times during the life of the process. Examples – Rupture of product piping, trained employees w/procedures injured during LOTO operation
3	Expected to occur several times during the life of the process. Examples – hose rupture, pipe leaks, pump seal failure
4	Expected to occur yearly. Examples - instrument component failures, valve failure, human error, hose leaks

Tabla n°4. Tabla de Probabilidad de ocurrencia del riesgo

Una vez realizada esta clasificación, se categorizan los riesgos como se muestra en la siguiente tabla:

Example Risk Priority Matrix					
Consequence ↑	4	C	B	A	A
	3	C	B	B	A
	2	D	C	B	B
	1	D	D	C	C
		1	2	3	4
Likelihood →					

Tabla nº5. Ejemplo de Una matriz de priorización de los riesgos.

Los riesgos sobre los que será imprescindible desarrollar dentro del estudio son los que tienen una clasificación A o B dentro de la Tabla, los riesgos de clasificación C o D quedarán a criterio del director del proyecto. Una vez realizada esta clasificación pasaremos a la segunda fase.

1.3.2.- Paso 2- Proceso

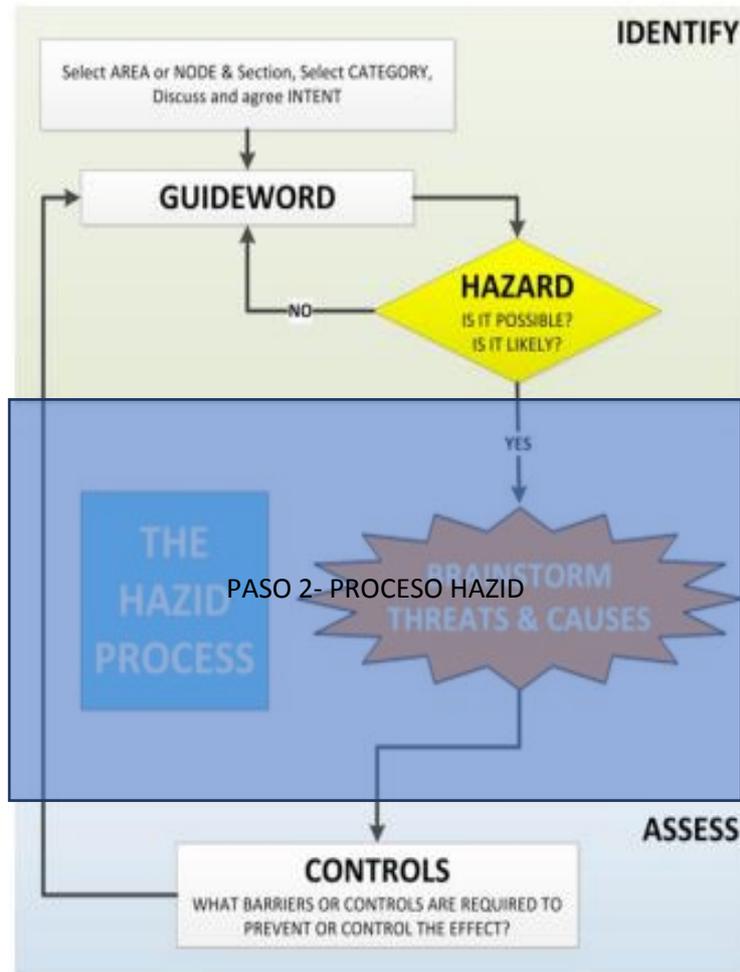


Figura n°5. Segunda fase del HAZID, Tormenta de ideas y estudio de escenarios ¹⁰

La parte central de un proyecto HAZID no se desarrolla mediante ninguna herramienta o metodología marcada como se comentaba en la introducción de este capítulo. Esta fase se basará en desarrollar proyectos independientes para cada uno de los riesgos seleccionados por el director del proyecto en el primer paso. Estos proyectos se realizarán por los expertos correspondientes en cada una de las áreas o procesos dónde encontramos los riesgos a estudiar.

Aunque las herramientas utilizadas y procedimientos para el estudio sean siempre diferentes, la estructura que presentarán estos proyectos será idéntica. Esta estructura consistirá en los siguientes pasos:

¹⁰ Ver http://www.halliburton.com/public/project_management/contents/Data_Sheets/web/H011228.pdf

1.3.2.1.- Identificar el fenómeno

La fase inicial de cada uno de los proyectos consistirá en la identificación del fenómeno. Llamaremos fenómeno a partir de ahora a la parte específica del proceso o el hecho concreto que provoca el riesgo que vamos a estudiar. Pongamos un ejemplo:

Presentamos la siguiente situación: La subida de presión en un conducto que transporta HC provoca que se generen fugas en una instalación. El riesgo en este caso está claro que es la fuga de HC que se produce. Para identificar el fenómeno nos deberemos preguntar cómo ha sucedido esa fuga. En este caso el fenómeno es el sobreesfuerzo que ha sufrido el conducto.

Una herramienta muy útil para comprender el fenómeno y definir correctamente todo el proceso es el 5W1H.

El 5W1H es una herramienta de análisis sistemática. La herramienta se utiliza para describir detalladamente y de manera previa al análisis del caso deseado para comprenderlo mejor, es decir, como habíamos comentado, comprender el fenómeno.

En el 5W1H rellenaremos una plantilla con información sobre las condiciones del sistema, la herramienta es simple: La técnica se basa en responder los siguientes puntos:

What: ¿Qué? Describimos la situación observada

Where: ¿Dónde? ¿Dónde se encuentra dentro de la instalación? ¿Y dónde se encuentra dentro del sistema estudiado?

When: ¿Cuándo? ¿Durante qué proceso y en qué momento de este ha ocurrido?

Who: ¿Quién? ¿A qué nivel está el factor humano relacionado con la ocurrencia de esta situación?

Why: ¿Por qué? ¿Qué desajuste ha producido la situación observada?

How: ¿Cómo? Definimos el fenómeno en este punto, cómo se ha desarrollado la situación observada.

1.3.2.2.- Comprender el fenómeno

Una vez identificado el fenómeno que produce el riesgo que estudiamos el objetivo será identificar todas las posibles causas que puede tener este fenómeno. Para ello, los miembros del equipo realizarán un *brainstorming*. La herramienta del *brainstorming* o Tormenta de Ideas consta de dos fases:

- 1- El equipo expondrá todas las debilidades del diseño y todas las causas posibles que puedan desembocar en la ocurrencia del fenómeno
- 2- El equipo comprobará el diseño y desestimará aquellas causas que no sean posibles.

Una herramienta muy extendida en diversas industrias para realizar estos *brainstorming's* es la herramienta de las 4 M. Se realiza el *brainstorming* pero clasificando las causas probables en *Man* (Hombre) *Method* (Estándares de funcionamiento) *Machine* (Máquina) *Material* (Materiales). Utilizando esta herramienta es más fácil focalizar el posterior análisis, puesto a que, usualmente, podemos identificar una de estas cuatro ramas como las causas probables principales y desestimar el resto.

En este punto, el equipo tendrá una idea de qué puede ocasionar el fenómeno, eso nos lleva a la siguiente fase:

1.3.2.3.- Causa Raíz

Llamaremos a la causa raíz a la causa última de que se produzca el fenómeno. Volvemos con el ejemplo de antes: la fuga del hidrocarburo. Pongamos que identificamos como causa probable el mal funcionamiento de una de las bombas que controla el flujo de HC dentro del conducto. Una causa raíz probable de este fenómeno sería el mal mantenimiento de las bombas, un diseño mal dimensionado o una bomba defectuosa.

¿Por qué es importante que hagamos este análisis? La causa raíz nos dictará dónde tenemos que actuar y de qué manera para contener o eliminar estas causas probables. Haremos este proceso para cada una de las causas probables que definimos durante el *brainstorming*. En definitiva, es importante dado que, cuando posteriormente el equipo defina sistemas de control y contramedidas será en particular a estas causas raíz a las que se deberá atacar.

El resultado del proyecto planteado podría ser el siguiente: Se comprueba el diseño y se verifica que el dimensionado de la bomba es correcto. Se verifica la frecuencia de mantenimiento y el equipo la considera insuficiente: la contramedida adoptada es redefinir la cadencia de mantenimiento de la bomba. Se plantean cómo evitar la instalación de una bomba defectuosa: definen un plan para testear las bombas antes de su instalación.

Precisamente este va a ser el siguiente paso dentro del HAZID: las contramedidas.

1.3.3.- Paso 3- Recomendaciones

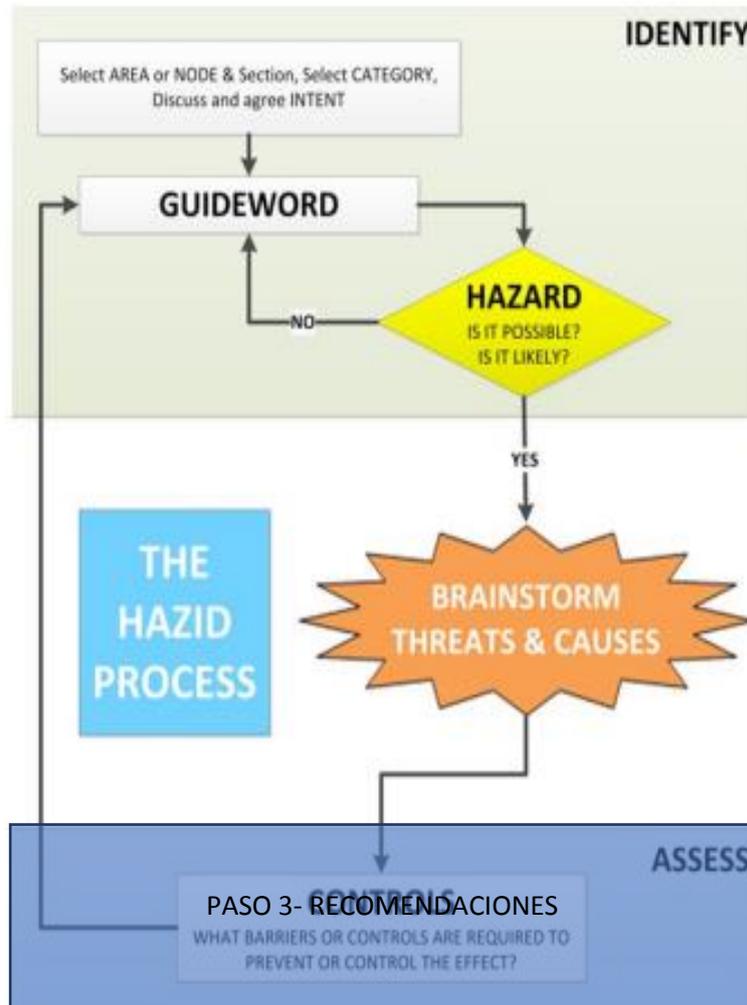


Figura n°6. Fase final del HAZID, Recomendaciones ¹¹

En este paso, como hemos comentado al final del paso anterior, los equipos propondrán para cada uno de los riesgos estudiados una serie de medidas para evitar la ocurrencia de estos y una serie de controles para identificar variaciones en las condiciones de trabajo que puedan ocasionar estos riesgos. Lo último que se requiere de un HAZID será una prueba estadística de la validez del estudio y de la robustez de los resultados. Uno de los indicadores que pueden utilizarse para ello es el Coeficiente de Concordancia propuesto por la IACS (documento MSC 78/19/3).

Finalmente, debemos tener en cuenta que todos los cambios que se realicen dentro del diseño o de los métodos de trabajo deberán realimentar la matriz del HAZID que hemos definido al comienzo del proyecto. Para concluir el equipo deberá volver a clasificar el mismo riesgo después de que se hayan realizado esos cambios, y si el riesgo sigue siendo crítico, volver a realizar el flujo de trabajo que hemos definido.

¹¹ Ver http://www.halliburton.com/public/project_management/contents/Data_Sheets/web/H011228.pdf

Después de las recomendaciones se hará un análisis de Beneficio/Coste para determinar la viabilidad de la aplicación de estas en función de los resultados esperados.

2. -HAZOP (*Hazard Operability*). Análisis de fiabilidad operativa.

En esta parte del trabajo comenzaremos analizando la técnica del HAZOP, eje central en las técnicas de evaluación y gestión de riesgos en numerosas industrias. En primer lugar, daremos una aproximación general del método, las técnicas que se utilizan y cómo se hace, y a continuación haremos un análisis más profundo de su aplicación en el sector náutico.

El significado del acrónimo es: Estudio de riesgos y operatividad (HAZOP)

El Estudio de riesgos y operatividad (HAZOP) ayuda a identificar y evaluar problemas que pueden representar riesgos para el personal, el equipo o la eficiencia de un proyecto. Los equipos multidisciplinarios se centran en elementos específicos (o nodos) del diseño del proyecto durante una serie de talleres.

Para cada nodo, el equipo examina los parámetros del proceso y las palabras guía para asegurar metódicamente que se explore el proceso de todas las formas posibles. El mejor momento para llevar a cabo un HAZOP es cuando el diseño de la instalación está terminado. Con el diseño terminado y la instalación en funcionamiento dispondremos de los datos y la información técnica suficiente para detectar el mayor número de riesgos posible.

2.1.- Definición

De la misma manera que hemos propuesto en el HAZID, para definir el método HAZOP consideraremos una definición adecuada para este trabajo la que nos ofrece el Bureau Veritas, pues desarrollan proyectos con estas herramientas para la industria marítima:¹²

“El estudio HAZOP es un método basado en un equipo bien estructurado y experimentado para la identificación de riesgos no previstos en el diseño del proceso o en posteriores modificaciones. La técnica consiste en realizar un examen detallado del proceso y de la ingeniería en instalaciones nuevas o existentes para evaluar los riesgos potenciales de la operación no previstas en el diseño, o el mal funcionamiento de los equipos y la consecuencia de sus efectos en una instalación y entorno.

El HAZOP es liderado por un auditor experimentado. Para un proyecto, el equipo HAZOP incluye habitualmente personal de Procesos,

¹² Ver <http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazop-estudiosriesgosoperabilidad>

Instrumentación, Máquinas, Ingeniería de Proyecto y Operaciones, y puede requerir también la participación de tecnólogos de proceso, especialistas ambientales y personal corporativo de Salud y Seguridad y Medio Ambiente en determinadas fases del estudio.

La identificación minuciosa de riesgos es la piedra angular de la gestión efectiva de riesgos, si un riesgo no ha sido identificado entonces no se pueden implementar las medidas para mitigar el mismo. Si un riesgo ha sido pasado por alto puede tener un impacto significativo en el éxito total de la operación. El HAZOP cubre seguridad, medio ambiente, operaciones y mantenimiento.

El HAZOP garantiza que:

Las desviaciones potenciales de las funcionalidades respecto al diseño son identificadas y corregidas

- *Los riesgos de HSE en los equipos son identificados*
- *Se pueden planear acciones para las mejoras necesarias del proceso e instrumentación*
- *Las respuestas son auditables por la dirección y las autoridades”*

2.2.- Introducción

La técnica HAZOP se basa en un análisis cualitativo de procesos y equipos. Esencialmente, el procedimiento del HAZOP se basa en cuestionar sistemáticamente cada parte de un proceso o una operación para descubrir cómo pueden ocurrir las desviaciones de su normal funcionamiento, el riesgo que estas desviaciones comportan y si se requieren medidas de protección adicionales, modificar los procedimientos de operatividad o cambiar el diseño de los sistemas que componen el proceso estudiado.

El procedimiento constará de una descripción completa del proceso que incluirá un estudio de su diseño y cuestionará sistemáticamente cada parte del mismo para descubrir cómo pueden ocurrir las desviaciones respecto a los estándares iniciales especificados por el diseño y determinar si estas desviaciones pueden dar lugar a peligros.

Dichas cuestiones se enfocarán secuencialmente en torno a una serie de palabras guía que dependen de las posibles desviaciones que pueden sufrir los parámetros estudiados. Las palabras guía aseguran que las preguntas planteadas para probar la integridad de cada parte del diseño cubrirán todas las posibles desviaciones que se puedan dar durante las operaciones respecto a los parámetros iniciales.

Algunas de las causas pueden ser tan poco probables que las consecuencias derivadas serán rechazadas por no ser significativas. Algunas de las consecuencias pueden ser

triviales, en cuyo caso tampoco se tendrán en cuenta. Una vez realizado este análisis se desarrollarán contramedidas para aquellas desviaciones que se consideren potencialmente peligrosas. La solución definitiva a un problema puede no ser obvia y podría necesitar un mayor análisis ya sea por un miembro del equipo o por un especialista externo, cuando esto ocurra se implementarán contramedidas temporales para reducir o eliminar los riesgos derivados de manera inmediata cuando sea necesario.

La principal ventaja de esta técnica es que el análisis sistemático permite una minuciosa identificación de todos los riesgos derivados de un proceso. El método se puede aplicar durante la etapa del diseño del proceso, durante la instalación de los equipos o se puede hacer un estudio específico para una instalación existente en la que se han identificado riesgos/desviaciones.

Para facilitar la realización de estos análisis debemos considerar que usualmente se toman dos premisas previas:

- 1-Que las especificaciones consideradas en el diseño de los procesos son óptimas para la prevención de riesgos y el correcto funcionamiento de las máquinas.
- 2- Que el estado de las instalaciones ha sido revisado anteriormente para que todo el sistema esté funcionando bajo especificaciones.

La razón por la que el HAZOP suele aplicarse juntamente con el HAZID es que gracias al HAZID podemos identificar los riesgos causados por el propio diseño. Así, como habremos identificado y comprendido este tipo de riesgos podremos corregir los parámetros de diseño cuando apliquemos el HAZOP. Durante la aplicación del HAZID aseguraremos que no obviamos ningún problema causado por el diseño o por las especificaciones de trabajo normales de la instalación, por eso lo obviaremos durante la aplicación del HAZOP.

2.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto HAZOP

Hay dos grandes fases en un proyecto de implementación del HAZOP: La identificación de los puntos de proceso a estudiar, los cuales dividiremos en nodos, y el análisis de operatividad de estos. Para ello se aplicarán iterativamente para cada uno de los sistemas o procesos estudiados los siguientes pasos:

- a) El diseñador del proceso describe brevemente el propósito general del diseño del proceso bajo estudio y muestra el diagrama de procesos (o equivalente) donde todos los miembros del equipo pueden verlo fácilmente.

- b) Se discuten todas las preguntas generales sobre el alcance y la intención del diseño.
- c) Se seleccionan los nodos o partes relevantes para el estudio. Por lo general son aquellas partes en las que un flujo importante de material entra en esa sección del proceso o en las que la complejidad de las operaciones es de especial relevancia.
- d) El diseñador del proceso explica en detalle su propósito, características de diseño, condiciones de operación, accesorios, instrumentación y sistemas de protección, etc.
- e) Luego se discuten todas las preguntas generales sobre los nodos o las partes relevantes.
- f) El estudio detallado "línea por línea" comienza en este punto. El líder de la discusión analiza junto al grupo todas las palabras guía elegidas como relevantes. Cada palabra guía, como ALTO CAUDAL, identifica una desviación de las condiciones normales de operación. A raíz de esto se impulsará la discusión de las posibles causas y efectos del flujo a una velocidad indeseablemente alta (en este ejemplo concreto). Si según la opinión del equipo de estudio la combinación de las consecuencias y la probabilidad de ocurrencia son suficientes para justificar una acción, entonces se considera como un "riesgo". Se revisarán a continuación los estándares operativos existentes, si estos se consideran suficientes para contener ese riesgo no se requerirán más acciones, si son insuficientes se realizarán proyectos para fortalecer estas debilidades. Para las principales áreas de riesgo, la necesidad de acción puede evaluarse cuantitativamente utilizando técnicas como el Análisis de peligros (HAZAN) o el Análisis de confiabilidad. Para riesgos menos críticos, la evaluación generalmente se basa en la experiencia y el juicio. Después de identificarlos, se designa una persona responsable para definir las acciones correctivas.

A continuación, se muestra un ejemplo de un proceso de una planta de procesamiento de gases y el procedimiento utilizado para realizar el estudio HAZOP:

El diagrama de flujo simplificado es el siguiente:

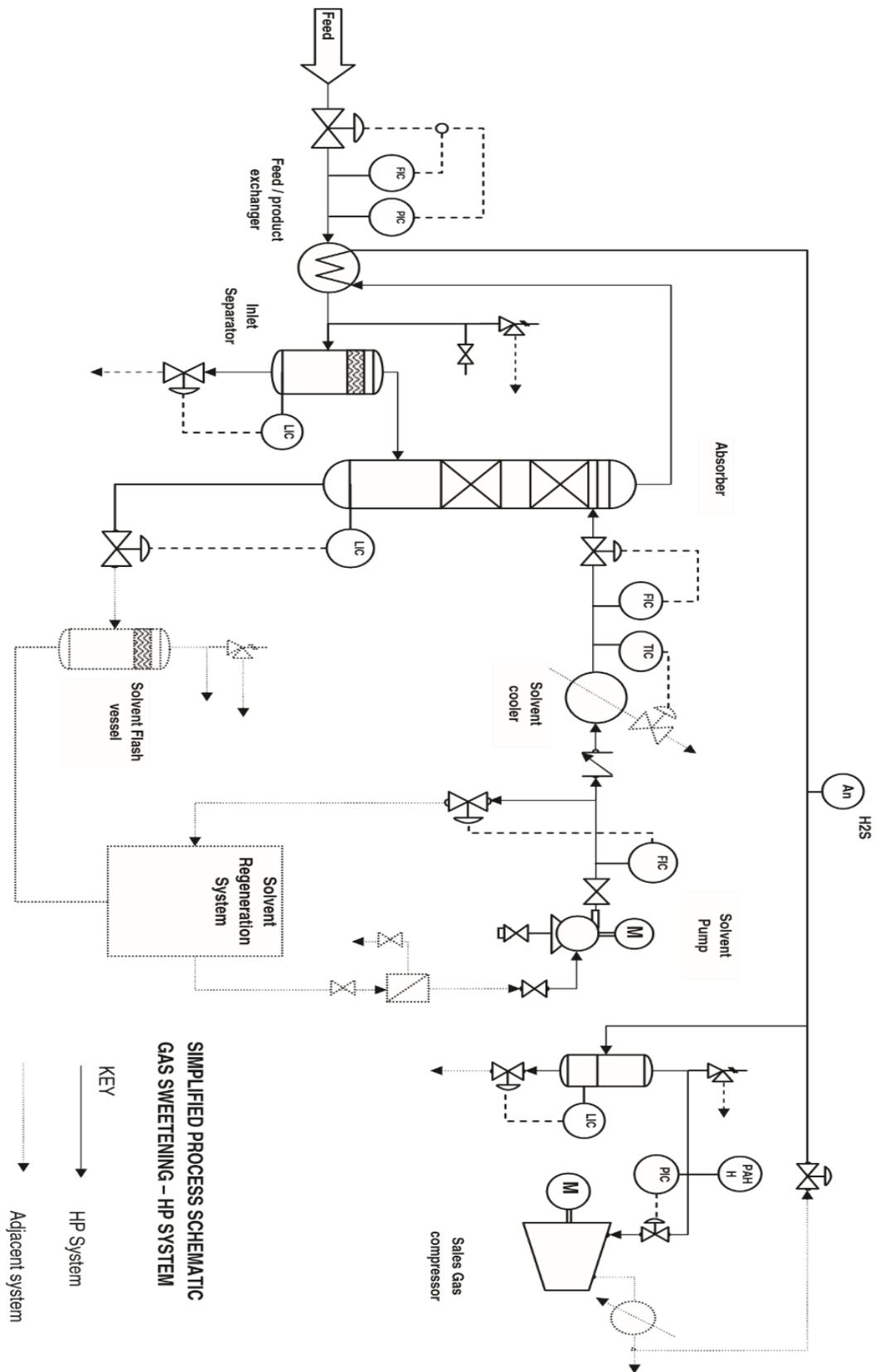


Figura nº7. Esquema del proceso de un sistema de filtración de gases¹³

¹³ Ver LIMB D. (2009): *HAZOP STUDIES – A NEW APPROACH?*

Y el procedimiento que se ha utilizado para estudiar la planta de procesamiento de gases el siguiente:

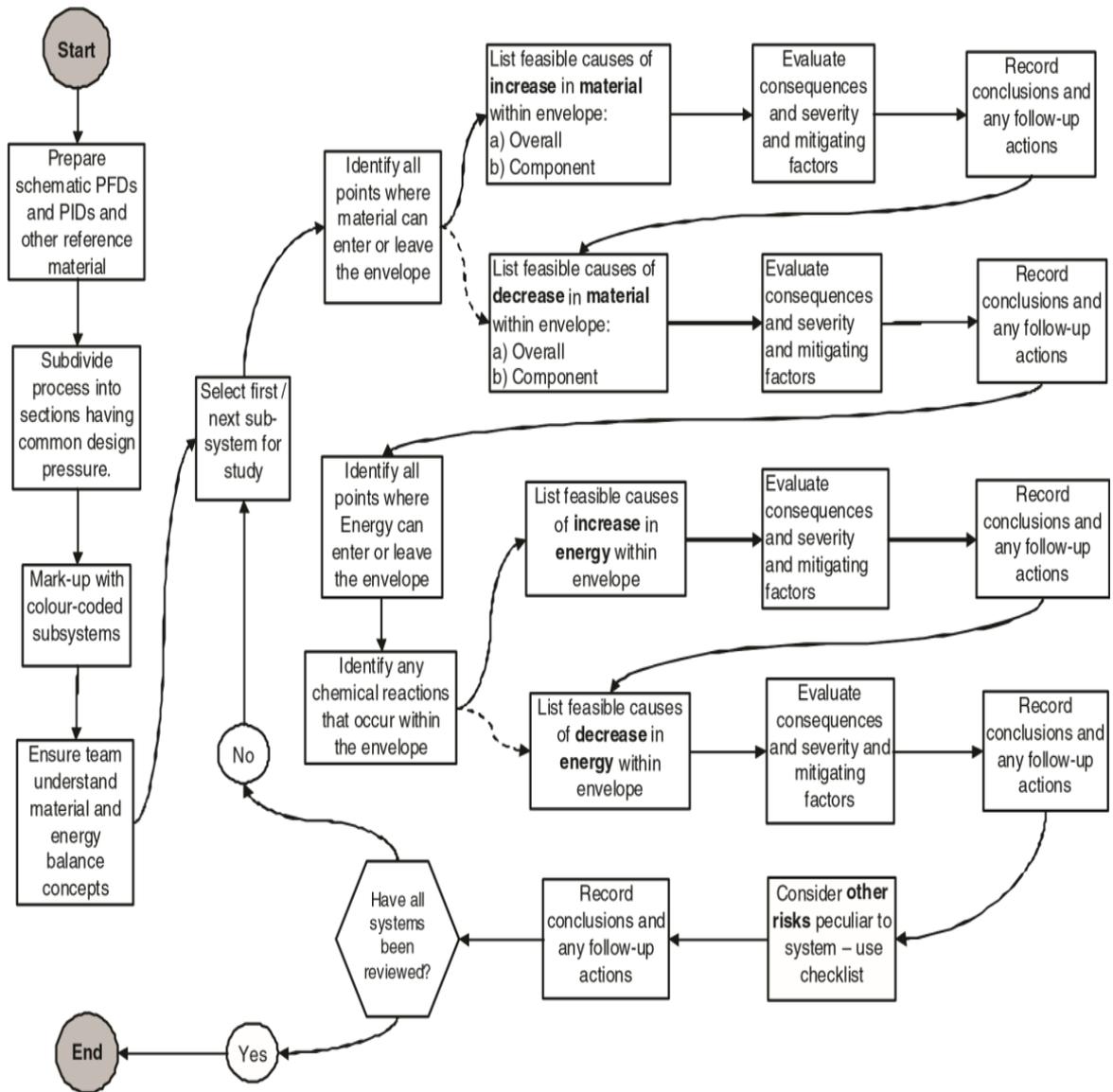


Figura n°8. Esquema del HAZOP de un sistema de filtración de gases ¹⁴

¹⁴ Ver LIMB D. (2009): *HAZOP STUDIES – A NEW APPROACH?*

2.3.1.- Paso 1- Identificación de los sistemas

En el paso 1 se deberán identificar los sistemas que se van a analizar, es decir, todos los sistemas que tienen relación con el proceso que se va a estudiar posteriormente. Para ello se recopilará la información de diseño, planos, especificaciones técnicas de todos los equipos estudiados. Además, se deberán configurar las palabras guía, es decir, los parámetros de funcionamiento a estudiar por cada uno de estos sistemas. Para ello el líder del proyecto recogerá conformará un equipo a lo largo de esta fase, escogiendo a un especialista en cada uno de los sistemas a estudiar.

Se necesita una descripción completa del proceso para guiar al equipo de HAZOP. Al menos un miembro del equipo HAZOP debe estar familiarizado con cada uno de los diagramas, planos y toda la instrumentación representada en ellos.

También pueden utilizarse modelos (ya sean físicos o generados por ordenador) de la instalación o fotografías de equipos similares. Ambos ayudan a visualizar incidentes potenciales, especialmente aquellos causados por errores humanos.

Al llevar a cabo un HAZOP en una planta que ya estuviera en funcionamiento o que sea una propuesta similar a otra que lo estuviera, también se podrían considerar incidentes pasados durante el transcurso del HAZOP.

Toda la información clave que puede requerirse durante el HAZOP debe estar disponible durante las fases iniciales del proyecto. Esto podría incluir:

- Planos de diseño
- Planos de áreas peligrosas
- Certificados de datos de seguridad
- Códigos o estándares relevantes
- Manual de funcionamiento de los equipos.
- Descripción detallada de los procedimientos.

Una vez el equipo analiza el sistema, se desglosará el proceso en diversos sistemas y subsistemas. Los sistemas son un conjunto de equipamientos que hacen una función específica dentro del sistema. Los subsistemas son un conjunto de equipos que hacen una función específica dentro de una parte específica del proceso.

Para comprender la diferencia entre sistema y subsistema pondremos un ejemplo:

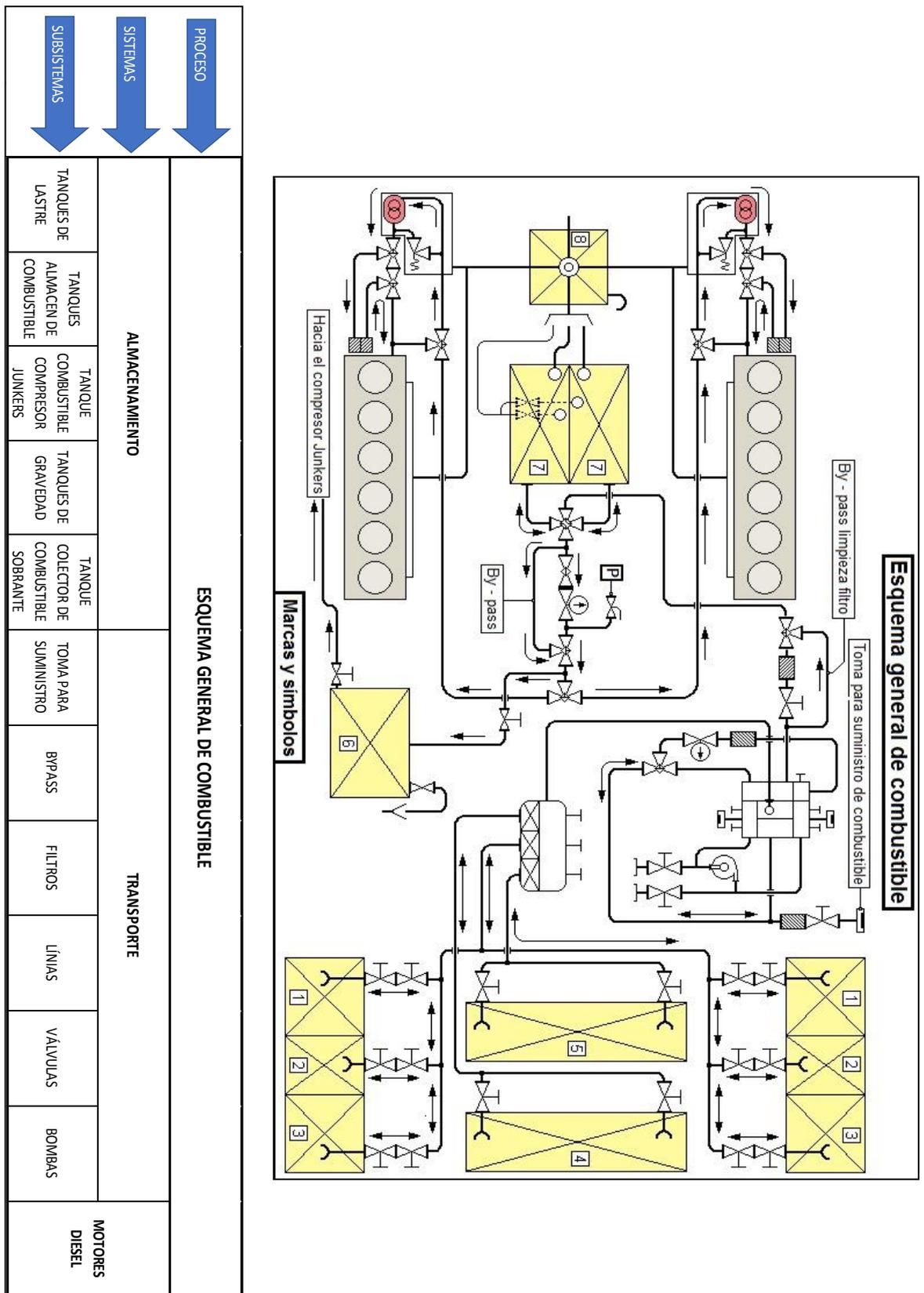


Figura nº9. Esquema general de combustible y división en Proceso, Sistemas y Subsistemas

En los proyectos HAZOP usualmente se escogen para su estudio aquellos sistemas donde se ha identificado alta probabilidad de riesgo o dónde la consecuencia de ese riesgo sea muy grave.

El análisis por sistemas y subsistemas puede ser muy profundo y llegar al nivel de analizar los equipos componente por componente. Esta profundidad variará en cada proyecto y dependerá la complejidad y el riesgo del proceso.

2.3.2.- Paso 2- Análisis de los sistemas

Una vez se han identificado los sistemas “críticos” para el proceso y se dispone de toda la información sobre esto se realizará un desglose en subsistemas y se identificarán los parámetros de funcionamiento de ellos. Una vez escogidos los parámetros se determinan las palabras guía que nos servirán para destacar todas las posibles variaciones en estos parámetros, es decir supondremos todas las maneras en las que estos parámetros pueden variar para luego ver la probabilidad de que estos varíen.

Usualmente las palabras guía se establecen en función de guías específicas que preparan previamente las empresas que aplican estas metodologías que se configuran por la tipología del sistema a estudiar. Las palabras guía son calificativos en inglés que definen el estado de una parte de la instalación respecto a sus estándares de funcionamiento. A continuación, se exponen las palabras guía más comúnmente utilizadas y su significado.

GUIDE WORD	SIGNIFICADO	COMENTARIOS
NO	Complete negation, e.g. of INTENTION	NO, ausencia. (e.j. hay flujo de aire a la salida cuando NO debería haberlo).
MORE	Quantitative increase	MORE (más) de alguna propiedad física relevante de lo que debería (e.j. flujo superior, temperature, pressure, viscosity, etc. also actions: heat and reaction).
LESS	Quantitative decrease	LESS (menos) ... (como el anterior)
AS WELL AS	Quantitative increase	Todas las INTENTIONS (intenciones) de diseño y operatividad se cumplen pero con algun problema (e.j. Impurezas, fases extra).
PART OF	Quantitative decrease	Solo algunas de las INTENTIONS se consiguen, otras no.
REVERSE	Opposite of INTENTION	Funcionamiento opuesto a la INTENTION (e.j. inyectar acido en vez de base en un control de pH).
OTHER THAN	Complete substitution or miscellaneous	No es parte de la INTENTION. Se consigue un efecto significativamente distinto del deseado. (e.j. encendido, apagado, modo de la operación no deseado).

Tabla nº6. Ejemplo palabras guía para un HAZOP¹⁵

A parte de ello el equipo que conforma el proyecto estudiará las condiciones de operatividad por las cuales una desviación o evento específico podría ocurrir y dar lugar a un riesgo.

Un ejemplo de algunos parámetros comunes para el estudio de una instalación industrial o de un buque sería:

- Temperatura
- Caudal
- Presión
- Corrosión
- Viscosidad
- Velocidad

¹⁵ Ver STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING (2011): HAZOP Guidelines, Documento Hazardous Industry Planning Advisory Paper Nº 8

Siguiendo con el ejemplo anterior, en el caso de la planta de tratamiento de gases los parámetros a estudiar son caudal, presión, temperatura y nivel, y las palabras guía para cada uno de ellos se especifican en la siguiente tabla (en este caso las traduciremos):

Palabras guía	Parámetros
No hay	Caudal
Más	Caudal
Menos	Caudal
Reverso	Caudal
Más	Presión
Menos	Presión
Reversa	Presión (1/4 de la nominal)
Más	Temperatura
Menos	Temperatura
Más	Nivel
Menos	Nivel

Tabla nº7. Ejemplo palabras guía para el ejemplo HAZOP planteado ¹⁶

En cada uno de los sistemas analizados se comprobarán estos parámetros y se estudiará el efecto en su variación. Los expertos estudiarán qué consecuencias tiene cada una de estas desviaciones y como pueden producirse. A partir de este estudio se clasificarán del 1-5 la probabilidad de que estos fenómenos ocurran y del 1-5 la gravedad en el caso de que ocurran. Según las puntuaciones obtenidas de los dos indicadores se le asignará una criticidad a cada uno de estos fenómenos. En la tabla podemos observar esta distribución:

¹⁶ Basado en STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING (2011): HAZOP Guidelines, Documento Hazardous Industry Planning Advisory Paper Nº 8

MATRIZ DE RIESGO NETO		PROBABILIDAD				
		1	2	3	4	5
GRAVEDAD	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

Tabla n°8. Ejemplo Matriz de Riesgo para un HAZOP

Utilizando esta clasificación se priorizarán los riesgos más críticos y se aplicarán contenciones inmediatamente. A continuación, se desarrollarán contenciones y contramedidas para el resto de los puntos identificados.

En la siguiente tabla podremos ver el resumen de los puntos estudiados, las conclusiones extraídas y las contramedidas tomadas en el caso del ejemplo de la planta de tratamiento de gases que hemos podido ver al principio de este apartado:

Overall Material Balance - increase of material within system - gas and liquid									
REFERENCIA DEL SISTEMA	Causes	Likelihood	Consequences	Severity	Remarks	Net Hazard	Mitigation	Action	
1	Sales compressor trips	5	Pressure rise in system	1		5	Inlet valve closes if on auto. Independent high pressure trip		
		5	Overpressure absorber - Loss of containment	5		25	PSV on absorber		
		5	Sales compressor loads up. IGVs open to try to maintain pressure	1		5			
		5	Solvent pump moves up curve. Min flow recycle may open.	1		5			
		5	Possible foaming or carryover from columns - damage to sales compressor	4		20	Suction scrubber		
2	Inlet Flow valve fails open	2	Pressure rise in system	1		2	Independent high pressure trip	check PSV capacity rated for full flow	
		2	Overpressure absorber - loss of containment	5		10	PSV on absorber		
3	Absorber Level valve fails closed	2	High level in absorber	2	Maybackflow into inlet scrubber	4	High level alarm on absorber bottoms		
4	Pump flow control maloperated	2		2		4	Training and control		
5	Compressor anti-surge valve opens	3	Pressure rises in system	2	Similar to compressor trip but less severe	6	Inlet valve closes if on auto. Independent high pressure trip		
Component Material Balance - increase of specific component(s) within system - gas and liquid									
Causes	Likelihood	Consequences	Severity	Remarks	Net Hazard	Mitigation	Action		
1	Increased acid gas in feed	5	Absorber may not be able to absorb - high acid gas ex absorber	1	Off specification sales gas. Potential corrosion in line	5	Alarm on Sales gas. Trip open gas to Flare.	Consider lining scrubber	

Tabla nº9. Ejemplo de una matriz de HAZOP ¹⁷

¹⁷ Ver LIMB D. (2009): *HAZOP STUDIES – A NEW APPROACH?*

2. 4.- Efectividad

Según el estudio realizado por el “*The New South Wales Department of Planning*”¹⁸, la efectividad de un HAZOP dependerá de:

- a) La precisión de la información (incluidos los datos del diseño) disponible para el equipo;
- b) Las habilidades y conocimientos de los miembros del equipo;
- c) El conocimiento y la experiencia del equipo en el uso del método sistemático como herramienta para identificar desviaciones;
- d) Mantener la proporcionalidad entre la gravedad de un peligro y el gasto de recursos para reducir su probabilidad;
- e) La competencia del líder del proyecto para garantizar que el equipo de estudio siga rigurosamente los procedimientos.

Los elementos clave de un HAZOP son:

- Equipo de HAZOP.
- Descripción completa del proceso.
- Selección de las palabras guía.
- Plan de seguimiento para implementar las contramedidas.

¹⁸ Ver STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING (2011): HAZOP Guidelines, Documento Hazardous Industry Planning Advisory Paper N° 8

3.- AMFE. Análisis modal de fallos y efectos.

Con los otros dos apartados: HAZID y HAZOP hemos visto, en cuanto a técnicas de gestión del riesgo, dos enfoques distintos para tratar el riesgo mediante técnicas cualitativas. En este apartado nos centraremos en el AMFE o Análisis Modal de Fallos y Efectos (FMEA en la literatura sajona por “*Failure Mode and Effects Analysis*”) es una técnica de análisis (no exclusivamente de riesgos, sino de todos los fallos que pueda haber en el sistema estudiado) que supone la antecámara de las técnicas cuantitativas de análisis puesto que, aún ser análisis cualitativos en esencia, puede requerir del uso de diversas técnicas cuantitativas en ciertas fases o procesos. Siguiendo con el proyecto FSA de instalaciones marítimas y portuarias, esta sería la siguiente herramienta a implementar para el control total de la seguridad. Esta herramienta complementa a las dos primeras, y es muy poco utilizada. Es interesante que la analicemos en este punto del trabajo ya que se enfocará en los mismos puntos que las dos primeras herramientas que hemos visto desde una óptica distinta.

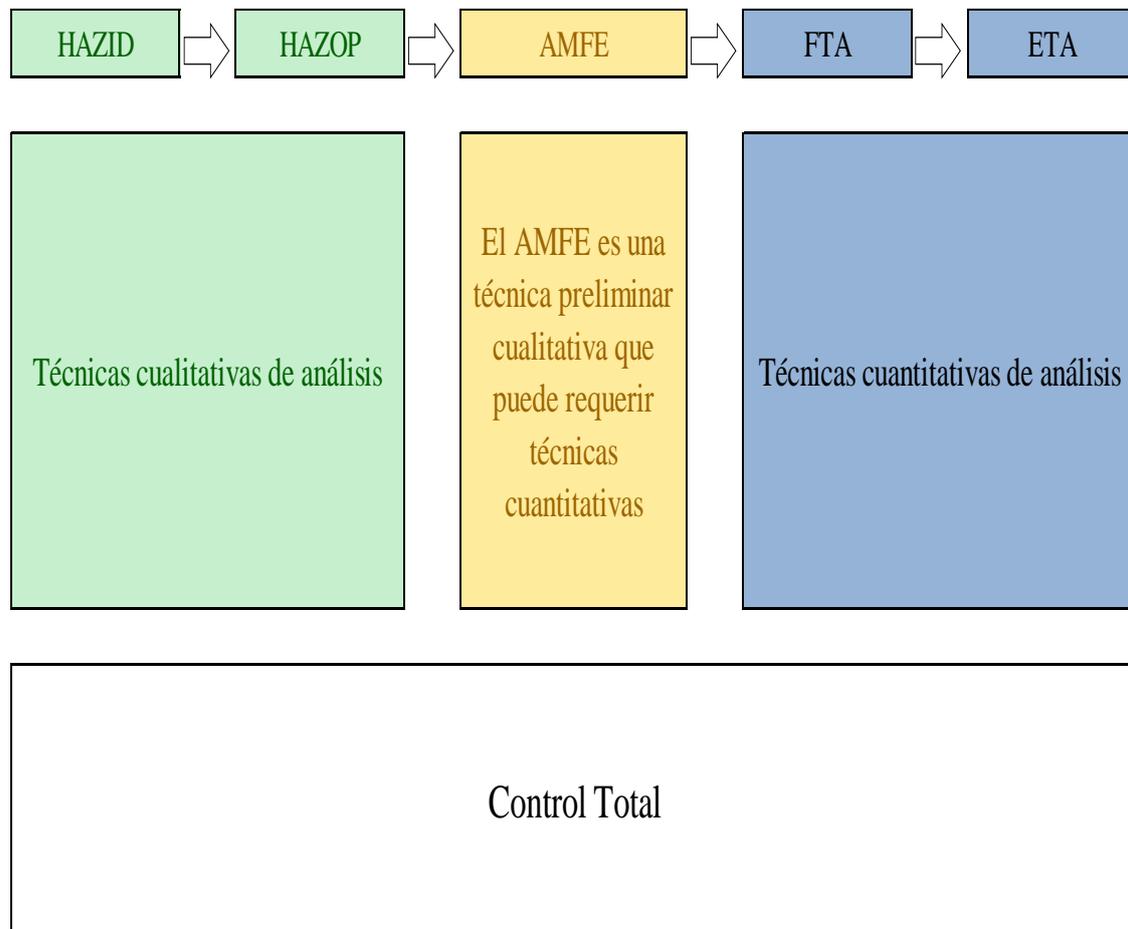


Figura nº10. Diagrama de la Gestión total del Riesgo

3.1.- Definición

Continuando con el esquema que hemos seguido para las dos primeras técnicas comenzaremos definiendo el concepto AMFE. Para ello utilizaremos la definición que nos da la Asociación Española para la Calidad, expertos en certificación de estándares de calidad del sistema de producción: ¹⁹

“El análisis modal de fallos y efectos (A.M.F.E.) es una metodología que se basa en diseccionar el diseño de un “futuro producto (/proyecto)” hasta el nivel componente o parte y estudiar los fallos que podrían producirse y las causas-efectos derivados del modo de fallos previsto. Este análisis debe realizarse para cada uno de los elementos del futuro proceso productivo basándose en los datos recogidos en el histórico de la empresa.

De manera que el AMFE es:

- Un método sistemático de investigación de las debilidades potenciales de productos / procesos.*
- Una técnica para cuantificar y evaluar el riesgo de fallo en los productos / procesos.”*

3.2.- Introducción

Como hemos comentado anteriormente el AMFE corresponde también a una parte esencial del control total de la seguridad de una instalación. El AMFE es una herramienta comúnmente utilizada en las fases iniciales del proyecto del mismo modo que el HAZID, pero estas dos herramientas tienen varias diferencias fundamentales, las más importantes son:

- El AMFE se puede aplicar en cualquier momento del proyecto.
- El AMFE puede contener una parte de análisis cuantitativa

El AMFE es una metodología que nos permite estimar y predecir los fallos que puede tener un producto/un proceso/una instalación. Aunque se suele aplicar en la fase de diseño del proyecto con la finalidad de incorporar las partes y las funciones necesarias para garantizar su fiabilidad, seguridad y el cumplimiento de las demandas del cliente (en el caso de productos), el AMFE es una herramienta que podemos utilizar durante

¹⁹ Ver <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/amfe>

toda la vida de un proceso, no obstante debemos tener en cuenta que una vez cerrado el diseño y con el proceso en funcionamiento todas las modificaciones que debamos hacer serán mucho más caras que, si por el contrario, lo hacemos directamente en la fase de diseño. El AMFE se nutre de los datos que la empresa tenga sobre procesos similares por lo que, por otro lado, si el proyecto está funcionando el AMFE será mucho más profundo porque tendremos datos de modos de fallo que ya han ocurrido en el proceso estudiado y posiblemente datos sobre las condiciones en las que estos modos de fallo se han dado. En este punto es donde, dentro del AMFE, entrará la parte del proyecto de la que hablábamos al principio: el análisis cuantitativo.

Otro punto a destacar del AMFE es que, mediante esta herramienta normalmente identificaremos no solo los riesgos de seguridad de los procesos estudiados, sino que también los modos de fallo de calidad, problemas de la instalación y factores externos.

Las áreas que suele incluir un AMFE son:

- Concepto: Análisis de sistemas en fases iniciales o antes del diseño.
- Diseño: Análisis de productos antes del prototipo y pre-series y antes de su producción.
- Proceso: Análisis de los procesos de fabricación y montaje.
- Máquinas y Equipos: Análisis de productos, maquinaria y equipos para mejorar su eficacia y calidad.
- Sistema: Análisis del sistema y sus funciones específicas.
- Software: Análisis de las funciones del software.
- Servicio: Análisis de los procesos del sector servicio antes de que sean puestos en marcha y el impacto de los fallos probables sobre el cliente o consumidor.

Los objetivos principales de un AMFE son:

- En primer lugar, nos permite reducir los plazos en los que se realizan los proyectos, ya que utilizándolo correctamente incrementará la eficiencia de las fases de desarrollo de los nuevos proyectos. Al predecir los fallos potenciales del proyecto en base de los datos de otros proyectos podremos evitar fallos durante la implementación del proceso o durante las operaciones, permitiéndonos simular durante el diseño las posibles causas de los modos de fallos y sus correspondientes posibles acciones correctivas.
- Analizar y evaluar la eficacia de las acciones que se han tomado. Esto nos permitirá conformar un sistema de mejora continua alrededor de los procesos tratados.
- Familiarizar y educar al personal durante la realización de los proyectos con el fin de que se habitúen a prever e identificar fallos y a analizar los proyectos desde diversas perspectivas. Crear una cultura de trabajo en la que los propios empleados identifiquen las causas probables de los problemas que encuentren en el desempeño de sus tareas, propongan soluciones y valoren los resultados.

De manera homóloga al HAZID y al HAZOP se definirá al principio del proyecto un equipo multidisciplinar que pueda cubrir el análisis de todos los procesos estudiados. Entraremos luego a verlo en más detalle. Pasemos ahora a analizar el flujo de acciones que componen la aplicación de un AMFE.

3.3.- Procedimiento de aplicación de un proyecto AMFE

Para explicar el flujo de aplicación de un AMFE nos basaremos en la descripción de este tipo de proyectos que se nos ofrece en la NTP 679²⁰ (Nota Técnica de Prevención). Las NTP son un conjunto de informes generados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo que corresponden a un conjunto de recomendaciones y directrices (no obligatorias) para la aplicación de buenas prácticas para la prevención de accidentes y la gestión de la seguridad en el entorno laboral. Extenderemos luego la información de cada una de las fases con información adicional a modo de completar el contenido que debe comprender un proyecto AMFE.

En primer lugar, veamos un esquema general del flujo de trabajo de un proyecto AMFE, y a partir de aquí desarrollaremos cada una de las fases del proyecto:

²⁰ Ver

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf

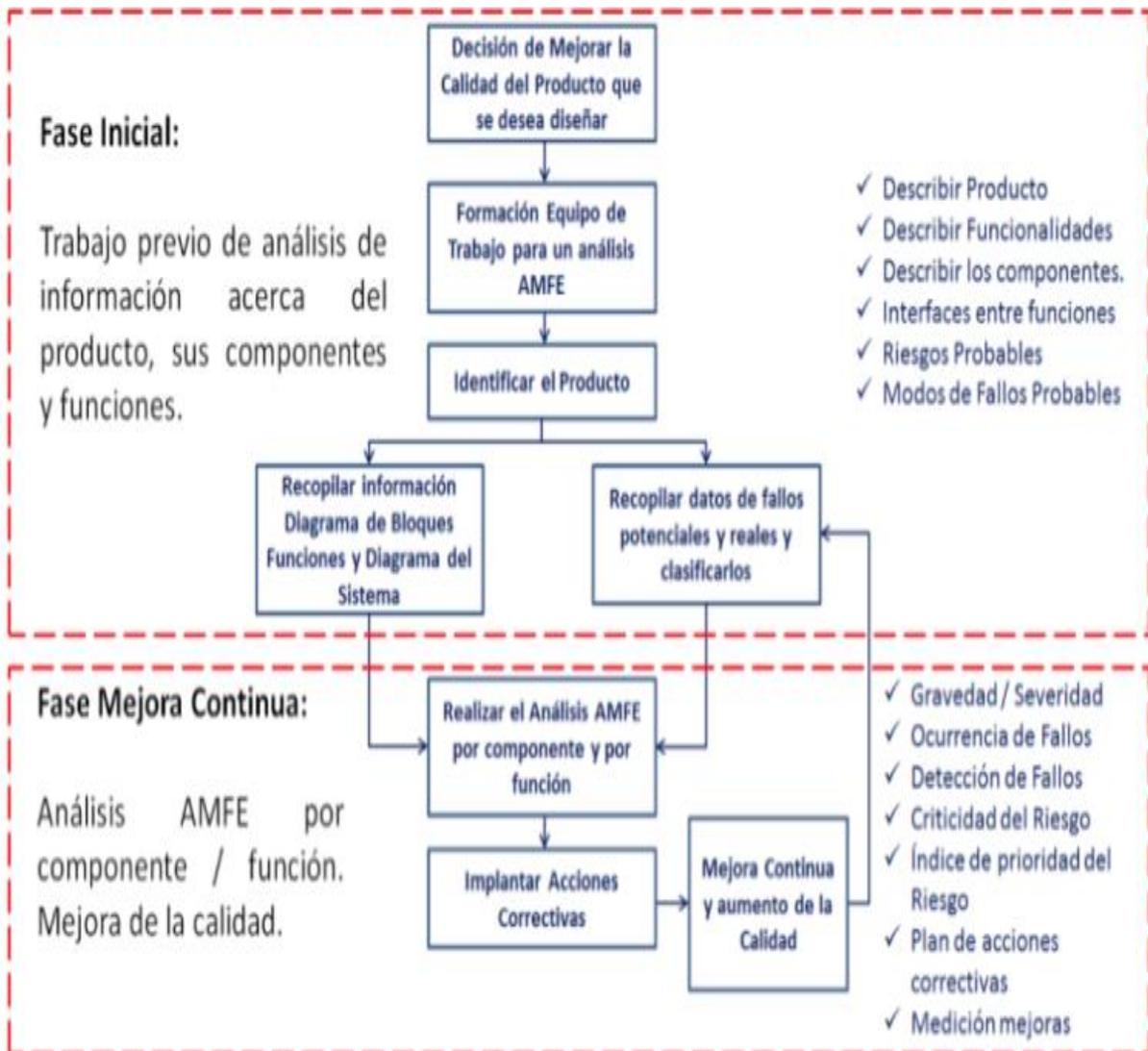


Figura nº11. Esquema de un AMFE ²¹

²¹ Ver <http://www.progressalean.com/analisis-de-modos-de-fallo-y-efectos-amfe/>

3.3.1.- Fase Inicial

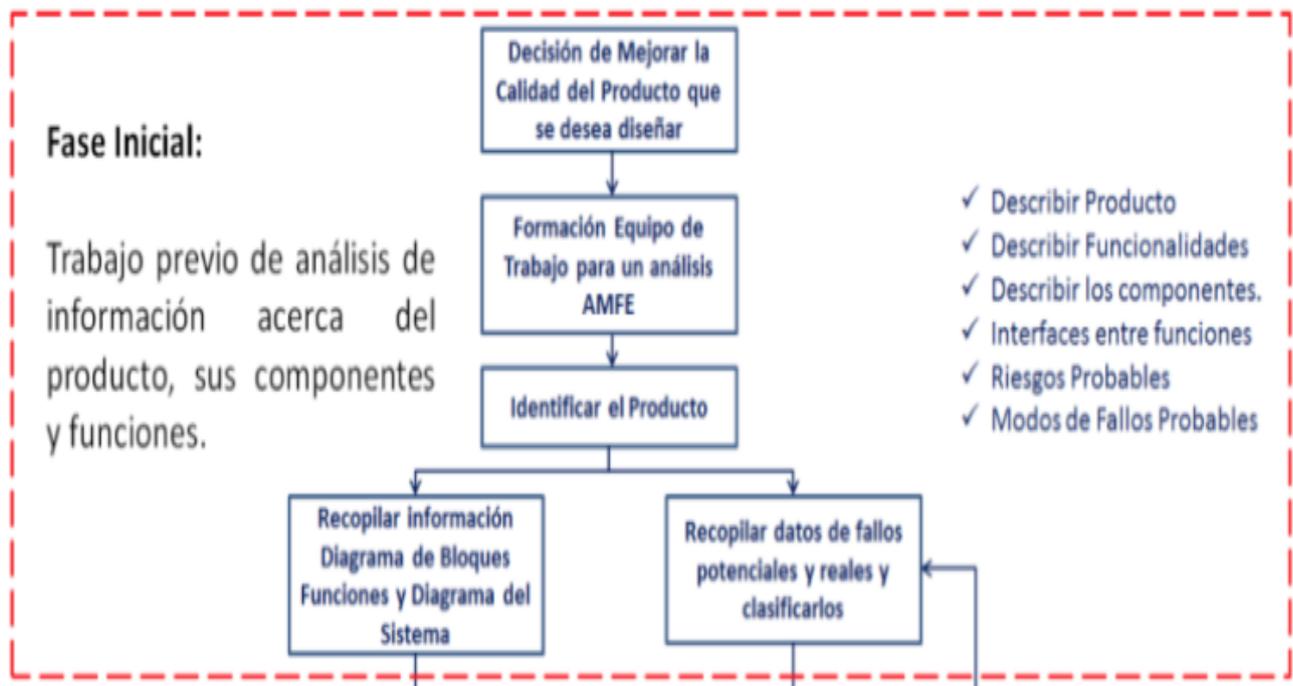


Figura nº12. Partes de la fase inicial de un AMFE ²²

Durante la fase inicial se realizará la recogida de datos y el desarrollo de un histórico de fallos con proyectos que presenten similitudes al estudiado.

En primer lugar, se formará un equipo interdisciplinar que comprenda expertos en las áreas técnicas a estudiar, también en los métodos cuantitativos y los sistemas de control y recogida de datos relacionados con el proyecto a analizar.

Para empezar, debemos identificar el área de estudio, y tal y como vimos en HAZID o HAZOP desglosar el sistema en sistemas y subsistemas. Después de eso se hará una descripción general del proceso, este comprenderá los siguientes elementos:

- Describiremos el producto/instalación/proceso a analizar.
- Describiremos sus funcionalidades.
- Describiremos los elementos que lo componen.

Luego seleccionaremos los procesos/operaciones clave para lograr los resultados esperados.

²² Ver <http://www.progressalean.com/analisis-de-modos-de-fallo-y-efectos-amfe/>

El trabajo más importante del AMFE se realizará en este punto: la recogida de información de los sistemas. Esta se basará en recopilar desde documentación técnica de utilidad para el análisis del sistema a estudiar, la documentación del propio proyecto y lo más importante: generar un histórico de fallos ocurridos en procesos parecidos que puedan replicarse en el proyecto que estamos estudiando. Sobre estos trataremos de recoger todos los datos que dispongamos de sistemas de control. Por otro lado, información sobre las premisas generales del proceso, funciones de servicio requeridas, exigencias de seguridad y salud en el trabajo.

Buscaremos también información adicional sobre prestaciones y fiabilidad de elementos clave del proceso.



Figura nº13. Información necesaria para el AMFE

3.3.2.- Fase mejora continua

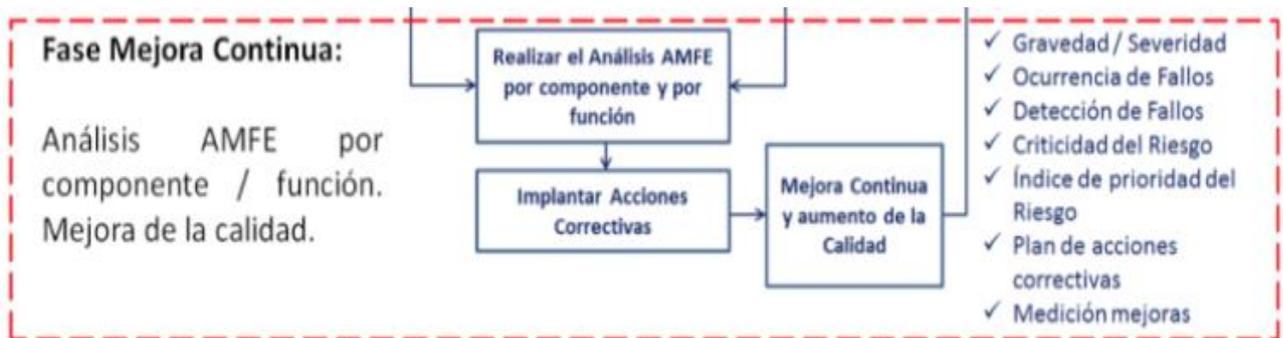


Figura nº14. Partes de la fase de mejora continua de un AMFE ²³

Una vez tenemos toda esta información necesaria requerida pasaremos a realizar el análisis AMFE de los puntos del proceso seleccionado. Este análisis consistirá en una hoja de análisis que constará de diversos puntos. A continuación, repasamos su contenido y analizamos como cumplimentar cada uno.

- 1- Denominación del componente e identificación: Deben incluirse todos los subconjuntos y componentes que formen parte del producto/proceso estudiado
- 2- Parte del componente. Operación o función: Se dividen estos subconjuntos en funciones específicas dentro del proceso. Por ejemplo: Carga, embalaje, transporte, ... Luego especificamos la función de cada componente dentro de estos procesos.
- 3- Fallo o modo de fallo: Nos referimos a modo de fallo como la forma en que una pieza o conjunto puede fallar, bien potencialmente o porque ya ha tenido lugar anteriormente.
- 4- Efecto/s del fallo: Cómo repercuten estos fallos en el sistema estudiado. Se trata de describir los efectos no deseados de que se dé un fallo en concreto. Estos efectos deben ser detectables y deberían indicarse en términos de rendimiento.
- 5- Causas potenciales del modo de fallo: En este punto, como hemos visto en el HAZID, estudiaremos las causas potenciales hasta llegar a la causa raíz mediante diversas herramientas.
- 6- Medidas de ensayo y control previstas: Reflejamos las medidas de control y la información que recoger de los controles para asegurar que son suficientes para evitar o por el contrario son insuficientes.
- 7- Gravedad: Según la robustez del sistema, ahora conocido, clasificaremos los diversos modos de fallo que podamos encontrar

²³ Ver <http://www.progressalean.com/analisis-de-modos-de-fallo-y-efectos-amfe/>

En esta siguiente tabla se muestra la clasificación de la gravedad del modo fallo según la repercusión en el cliente/usuario.

GRAVEDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Baja Repercusiones imperceptibles	No es razonable esperar que este fallo de pequeña importancia origine efecto real alguno sobre el rendimiento del sistema. Probablemente, el cliente ni se daría cuenta del fallo.	1
Baja Repercusiones irrelevantes apenas perceptibles	El tipo de fallo originaría un ligero inconveniente al cliente. Probablemente, éste observaría un pequeño deterioro del rendimiento del sistema sin importancia. Es fácilmente subsanable	2-3
Moderada Defectos de relativa importancia	El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. El cliente observará deterioro en el rendimiento del sistema	4-6
Alta	El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.	7-8
Muy Alta	Modalidad de fallo potencial muy crítico que afecta el funcionamiento de seguridad del producto o proceso y/o involucra seriamente el incumplimiento de normas reglamentarias. Si tales incumplimientos son graves corresponde un 10	9-10

Tabla nº10. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Gravedad del riesgo.²⁴

8- Frecuencia: Clasificaremos también en función de la frecuencia (probabilidad en caso de que sea un fallo hipotético) de ocurrencia del modo de fallo, lo mostramos en la siguiente tabla:

FRECUENCIA	CRITERIO	VALOR
Muy Baja Improbable	Ningún fallo se asocia a procesos casi idénticos, ni se ha dado nunca en el pasado, pero es concebible.	1
Baja	Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Es razonablemente esperable en la vida del sistema, aunque es poco probable que suceda.	2-3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Probablemente aparecerá algunas veces en la vida del componente/sistema.	4-5
Alta	El fallo se ha presentado con cierta frecuencia en el pasado en procesos similares o previos procesos que han fallado.	6-8
Muy Alta	Fallo casi inevitable. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	9-10

Tabla nº11. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Frecuencia del riesgo.²⁵

²⁴Ver

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf

²⁵ Ver

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf

- 9- Controles Actuales: Aquí reflejaremos todos los controles existentes que puedan detectar o prever la ocurrencia de estos fallos.
- 10- Detectabilidad: Mediante la información obtenida, ahora se indica la probabilidad de que la causa o modo de fallo estudiado sea detectado a fin de evitar que este ocasione daños. Lo vemos en la siguiente tabla

DETECTABILIDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Alta	El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes	1
Alta	El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría en alguna ocasión escapar a un primer control, aunque sería detectado con toda seguridad a posteriori.	2-3
Mediana	El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente . Posiblemente se detecte en los últimos estadios de producción	4-6
Pequeña	El defecto es de tal naturaleza que resulta difícil detectarlo con los procedimientos establecidos hasta el momento.	7-8
Improbable	El defecto no puede detectarse. Casi seguro que lo percibirá el cliente final	9-10

Tabla nº12. Tabla de Criterios, valor y correspondencia con la Detectabilidad del riesgo.²⁶

- 11- Índice de prioridad de riesgo: Se calcula mediante el producto de *Gravedad* × *Frecuencia* × *Detectabilidad*.
- 12- Acción correctora: Atacaremos con proyectos independientes todos aquellos fallos críticos del proceso. Gracias al Índice de prioridad de riesgo priorizamos en las áreas más críticas.
- 13- Responsable y plazo: Distribución de las tareas a realizar dentro de los proyectos de implementación en cada una de las medidas a implementar. Se sigue la distribución PDCA. “Plan” Planificación – “Do” Acciones – “Check” Comprobaciones – “Act” Estandarización y extensión de las medidas tomadas.

A continuación, se muestra un ejemplo de un AMFE cumplimentado. La plantilla es la propuesta por la NTP:

²⁶ Ver

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)																
AMFE DE PROYECTO <input type="checkbox"/>			AMFE DE PROCESO <input type="checkbox"/>			DENOMINACIÓN DEL COMPONENTE / PARTE DEL PROCESO			CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE			Hoja:				
NOMBRE Y DPTO. DE LOS PARTICIPANTES Y/O PROVEEDOR:			COORDINADOR: (Nombre / Dpto.)			MODELO/SISTEMA/FABRICACIÓN			FECHA INICIO:			FECHA REVISIÓN:				
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLO Nº	MODOS DE FALLO	FALLOS POTENCIALES			ESTADO ACTUAL					ACCIÓN CORRECTORA	RESPONSABLE / PLAZO	SITUACIÓN DE MEJORA			
			EFECTOS	CAUSAS DEL MODO DE FALLO	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL PREVISTAS	F	G	D	IPR	ACCIONES IMPLANTADAS			F	G	D	IPR
Soldadura MIG	1.1	Falta soldadura	Retrabajos, ruidos, falta de rigidez	Defectos de acoplamiento	Ninguna	8	8	2	128	Previsos grupos y aprietes en zona MIG	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.2			Pestanas fuera de geometría	Ninguna	8	8	2	128	Pestanas bien diseñadas para garantizar geometría	Proyectos / Anteproyecto					
	1.3	Soldadura defectuosa	Agujeros en chapa	Desacoplamiento chapas	Ninguna	8	8	2	128	Garantizar geometrías y acoplamientos	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.4	Mala calidad de soldadura	Retrabajos, ruidos, grietas	Parámetros de soldadura incorrectos	Ninguna	2	9	8	144	Acceso restringido a los parámetros de máquina. Control periódico de los mismos.	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.5	Proyecciones suciedad poros	Óxido, suciedad en bajos en pinturas	Falta de gas. Malos parámetros	Ninguna	6	8	7	336	Incorporar medios en la estación para eliminar suciedad.	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.6			Ausencia de vallas oscuras	Ninguna	10	8	2	160	Colocar pantallas de protección en zonas de soldadura MIG	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.7	Destumbramiento	Problemas de visión de los operarios	Ausencia de puertas oscuras	Ninguna	10	8	2	160	Colocar puertas de protección para no destumbrar	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.8	Exceso de humos	Exposición a agentes químicos	Campanas de humos ubicadas muy alejadas de la zona de emanación del humo.	Ninguna	6	8	4	192	Colocar campanas de aspiración. Justo al lado de la fuente del humo.	Proceso Chapa / Anteproyecto					
	1.9	Exceso de fuego	Proyecciones	No hay protección	Ninguna	6	5	6	180	Caja de latón que protege chapa y la máquina, todo ello en sus partes vistas.	Proceso Chapa / Anteproyecto					

Tabla nº13. Plantilla para la matriz de un AMFE ²⁷

²⁷ Ver

3.3.3.-El cálculo del Índice de Prioridad de Riesgo

El IPR o NPR (Número de Prioridad de Riesgo) es quizá el punto distintivo más importante entre los primeros métodos de análisis de riesgo que hemos visto y el AMFE, pues es aquí dónde vamos a ver un enfoque más analítico desde el punto de vista cuantitativo respecto a ellos.

La base para calcular este indicador se basa en la clasificación GOD (SOD según definiciones), que separará las acciones necesarias a realizar según la Gravedad (Severidad), Ocurrencia y Probabilidad de Detección del evento estudiado.

-La Gravedad se calculará como un número del 1 al 10 teniendo en cuenta el impacto que tiene la ocurrencia del evento

-La Ocurrencia es un indicador que cuantifica del 1 al 10 en función de la frecuencia con la que ocurre el evento. Esta frecuencia se puede calcular respecto al tiempo o respecto a número de ciclos del proceso. Es decir, si hablásemos de un evento en un buque podríamos calcular las veces que pasa por tiempo de navegación o las veces que ocurre por travesía.

-La probabilidad de detección es un indicador que va del 1% al 100% que se calcula dividiendo por el número de veces que se ha dado el evento las veces que este ha sido detectado.

La diferencia fundamental entre los anteriores sistemas presentados y el AMFE es que a los 2 factores (gravedad y probabilidad de ocurrencia) que ya teníamos en cuenta, se le suma este tercero, la probabilidad de detección, que va a ser un indicador que se extraerá directamente de los sistemas de detección y por lo tanto que se calculará con una gran cantidad de datos que se extraen directamente del proceso. A parte de ello la clasificación de los otros riesgos será también en una base numérica del 1 al 10 y se llevará a cabo un análisis más minucioso desde el punto de vista técnico ya que se cruzará una cantidad mucho mayor de datos sobre los fallos.

Por ello es posible que mediante el AMFE dejemos más puntos ciegos en cuanto a modos de fallo o riesgos que en el HAZID/HAZOP, ya que nos centraremos mucho más en analizar situaciones que se hayan observado previamente en el proyecto estudiado o en otros similares, en vez de centrarnos en hacer la tarea anteriormente comentada de plantearnos escenarios hipotéticos para cubrir un espectro mucho mayor de oportunidades de mejora. No obstante, en los puntos que estudia el AMFE, este nos da una conclusión mucho más robusta, pues el análisis está mucho más centrado en el estudio numérico de parámetros e indicadores de situaciones reales. Es en este punto dónde será especialmente interesante estudiar la combinación de las tres herramientas: Limitando los esfuerzos analíticos del HAZID y el HAZOP e intentar cubrir un espectro mucho mayor de escenarios para luego, mediante el AMFE hacer un análisis

concienzudo de las situaciones más conocidas o que se puedan estudiar con más facilidad.

Para finalizar, el IPR o NPR es un indicador numérico que irá del 1 al 1000 y se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$IPR = G \times O \times D$$

Se calculará para cada uno de los fallos estudiados y será el indicador que se tendrá en cuenta para realizar las recomendaciones y, posteriormente, junto al análisis de coste de cada uno de los puntos críticos para definir cuáles serán los puntos del proceso que se atacarán

4. – FTA y ETA - Árbol de fallos y Árbol de eventos. El modelo *bow-tie*.

Las últimas herramientas que vamos a presentar como parte del proyecto de gestión de la seguridad son el *Fault Tree Analysis* y el *Event Tree Analysis*. FTA y ETA son dos herramientas puramente cuantitativas que sirven para analizar la relación causa-efecto entre factores diversos y ocurrencias con los modos de fallo a estudiar en la instalación o proyecto seleccionado. Las dos herramientas usualmente se utilizan juntas, no obstante, no se deben de confundir, pues se centrarán en analizar partes distintas del evento no deseado.

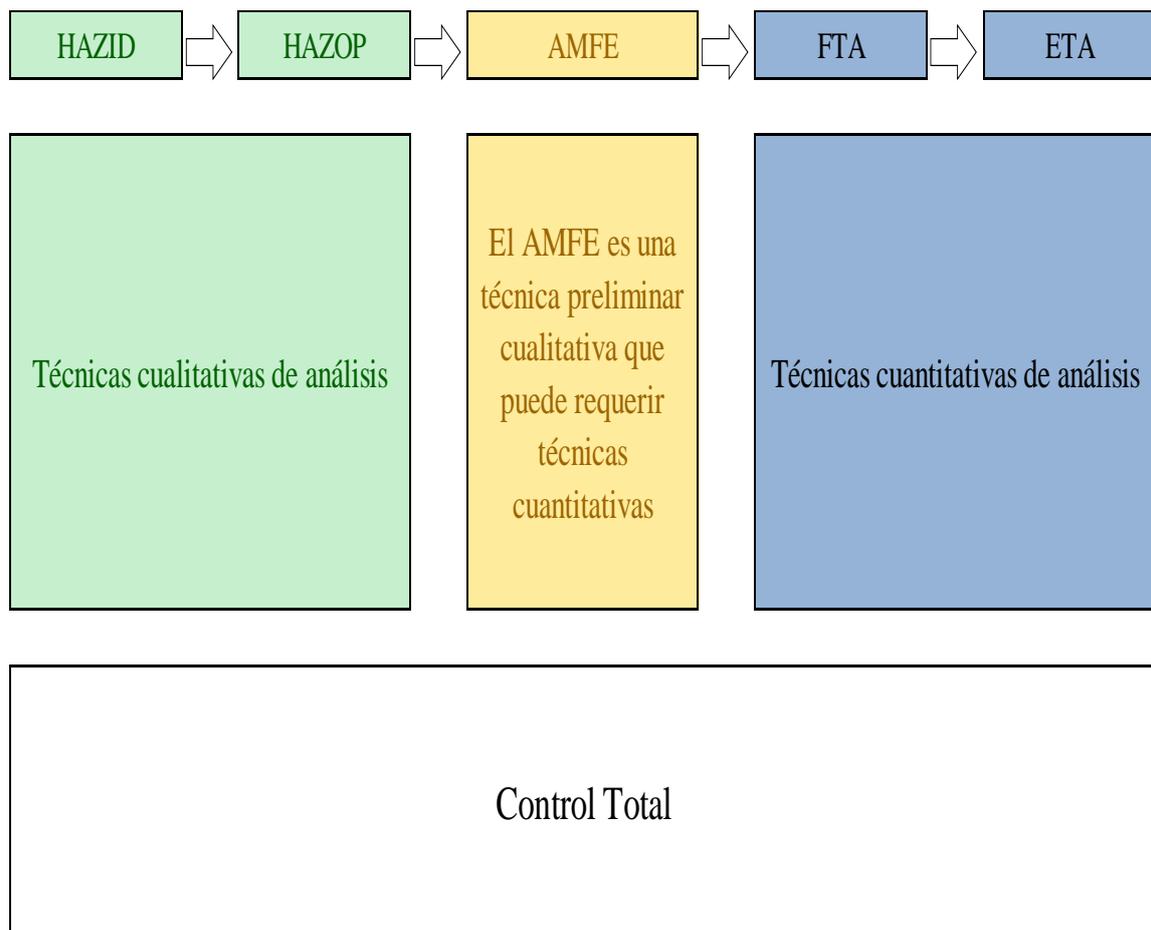


Figura nº15. Diagrama de la Gestión total del Riesgo

Analicemos estas diferencias:

- El FTA se centrará en analizar las diversas causas que provocan el evento que queremos evitar (en este caso, el riesgo para la seguridad identificado), una vez estudiadas las relaciones causa/efecto entre los precedentes y este evento lo utilizaremos para encontrar medidas preventivas para el problema.
- El ETA, por otro lado, se utiliza para analizar las consecuencias que conlleva la ocurrencia del evento no deseado. Una vez identificadas las consecuencias y su tendencia, el proyecto se centrará en encontrar medidas que las mitiguen.

Al ser las dos herramientas en metodología y objetivos diferentes, las veremos las dos por separado para ver a la vez sus diferencias y cuando se deben aplicar sin dependencia de la otra.

4.1.- Información necesaria

Antes de explicar cada una de las metodologías que estudiaremos mostraremos previamente la información necesaria para aplicar cualquiera de las dos, ya que, como hemos comentado, las necesidades son parecidas pues van a evaluar de diferentes formas los mismos eventos. Para poder definir correctamente el sistema y considerar toda la información necesaria para la aplicación de un proyecto FTA o ETA deberemos contar con una descripción de las funciones del sistema y una identificación de los diversos subsistemas que lo componen. Para ello la información necesaria para construir un “*bow-tie*” deberá contemplar:

- Intención del diseño
- Un sumario que contemple todos los fallos potenciales del sistema, que defina en qué consiste este fallo y cuáles son sus consecuencias.
- La estructura funcional del sistema a estudiar, es decir el diagrama de bloques explicando su funcionamiento y la documentación que lo describe.
- Planos del sistema.
- Identificación de condiciones de funcionamiento del sistema. Descripción de su funcionamiento y de los parámetros con los que opera dependiendo de sus diferentes modos de trabajo. Ej. Presión de un sistema de líneas en sus diferentes modos de trabajo: Carga, descarga, reflujo, ...
- Condiciones ambientales, entorno del sistema, interacción humana con la operativa del sistema.
- Manuales, documentación de diseño, normativa de la empresa o específica del sistema a analizar.
- Condiciones de mantenimiento y seguimiento de la realización de las tareas de mantenimiento rutinarias. Histórico de las averías con informes que expliquen en qué condiciones se dieron y que problemas causaron las averías.

Cuanta más de esta información dispongamos más completo será nuestro análisis. Nótese que toda esta información está incluida en cualquiera de los otros métodos cualitativos estudiados durante este trabajo. De esta manera vemos como no solo son metodologías complementarias a nivel de resultados para la prevención de la seguridad, sino que el coste de oportunidad de aplicar conjuntamente el “*bow-tie*” con cualquiera de las metodologías mencionadas (véase HAZID o HAZOP) es muy bajo. En capítulos posteriores reflexionaremos con más profundidad sobre la compatibilidad y el interés de combinar estas metodologías.

4.2.- FTA - *Fault Tree Analysis*

El FTA es una herramienta de carácter deductivo, es decir, se deducen sus premisas de hipótesis generales. Esta se utiliza en la mayoría de campos científicos, pero especialmente para análisis de seguridad o ingeniería del software. Sus objetivos son:

- Identificación de las causas o combinación de estas que pueden provocar el evento estudiado.
- Determinar cómo de confiables son las medidas de contención para el tipo de fallo estudiado y ver si cumplen con los requerimientos del sistema.
- Determinar qué factores tienen más peso en la ocurrencia del evento estudiado, es decir, la probabilidad de que se produzca el evento por cada una de sus causas potenciales.
- Calcular la frecuencia de ocurrencia de cada una de esas causas potenciales.
- Identificar entre estas causas potenciales las que puedan ocasionar otros modos de fallo.
- Analizar y comparar diferentes alternativas de diseño para mitigar la máxima relación probabilidad-frecuencia posible (Optimizando los recursos existentes).

Los FTA son especialmente útiles en el análisis de sistemas que se componen de varios elementos dependientes entre sí, es decir, con una correlación alta. Por ejemplo, un sistema de líneas el cual es afectado tanto por temperatura como por la presión, la variación de los dos parámetros será provocada por partes del sistema y modos de fallo diferentes entre sí, pero la variación de una de las dos variables afectará a la otra. Se utilizan especialmente durante la fase de diseño en proyectos muy complejos, aunque también puede darse que el evento se identifique durante cualquier fase de la vida del producto. Sus usos más frecuentes son:

- Determinar qué combinaciones de condiciones provocan un fallo de gran complejidad que se acaba de detectar. (Funcionamiento habitual de la instalación)
- Determinar cómo de robusto es un sistema diseñado para prevenir la ocurrencia de un fallo de seguridad. (Durante la fase de diseño)
- Determinar la fiabilidad de los sistemas de una instalación en términos de seguridad. (Auditorías, inspecciones, ...)

4.2.1.- Procedimiento de aplicación del FTA

Para cumplir con los objetivos del FTA deberemos seguir un procedimiento que consta de 5 fases distintas:

- Identificación de los objetivos del proyecto: ¿En qué medida queremos reducir la probabilidad de ocurrencia de este evento? ¿Beneficio/Coste esperado/máximo?
- Definición completa del evento a estudiar: Análisis de gravedad / frecuencia de ocurrencia. Información relevante para el estudio, histórico de datos y segregación de las causas potenciales. Diagrama del sistema y clasificación de subsistemas. En definitiva, toda la información que podría aportar un AMFE sobre el evento a estudiar.
- Definición del alcance del proyecto: es decir, que información se tomará en cuenta para el análisis, las condiciones operativas del sistema, el mantenimiento de estos y si se debe tomar en cuenta el papel de estos factores en el cálculo para la ocurrencia del evento o no. Lo que determina el alcance es hasta qué punto se quiere modificar el sistema; si se optará por una modificación de diseño o si se diseñaran contenciones mediante una modificación de los parámetros de funcionamiento de este o la frecuencia o el tipo de mantenimiento que se le hace al sistema.
- Desarrollo del FTA: Veremos a continuación cómo se construye.
- Interpretación y conclusiones del análisis: Cómo hemos visto en los otros proyectos se identificarán los puntos de mayor impacto y, si aplica, se propondrán contramedidas para mitigarlos.

Para el estudio de esta herramienta nos vamos a centrar en el desarrollo del árbol de fallos y eventos mediante el método cuantitativo. Esto es, cuando el análisis sistemático que se realiza previamente al desarrollo del FTA identifica no solo los factores que

contribuyen a la ocurrencia del evento estudiado, sino la probabilidad de que estos factores ocurran. Luego interrelacionaremos estos factores entre si utilizando las puertas lógicas que nos permitirán calcular cómo influye la interrelación entre los diferentes factores en términos de probabilidad para que el evento ocurra.

Veamos en primer lugar en qué consisten los nodos y puertas lógicas y qué implican en términos calculísticos y luego veamos cómo se compone un FTA mediante algún ejemplo concreto.

4.2.1.1.- Puertas lógicas

Las puertas lógicas son elementos del álgebra booleana que nos indicarán cómo operar entre si las probabilidades de ocurrencia de los factores estudiados. En primer lugar, clasificaremos mediante lo que denominaremos nodos los eventos que pueden producir el evento estudiado. Los más utilizados y su significado se muestran en la siguiente tabla:

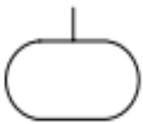
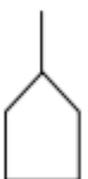
Símbolo	Nombre	Definición	Descripción
	Evento básico	El evento de nivel más bajo para el cual la probabilidad de ocurrencia i fiabilidad de la información es suficiente.	Modo de fallo de un componente o una causa de fallo individual.
	Evento condicional	Evento que es condición de ocurrencia de otro evento cuando ambos han de ocurrir para que las consecuencias se desarrollen.	Evento condicional requerido para que la consecuencia ocurra usado con las puertas & PRIORITARIO y INHIBIR.
	Evento durmiente	Un evento primario que representa un fallo durmiente; un evento que no es inmediatamente detectado, pero puede ser detectado mediante inspecciones o análisis adicionales.	Un evento primario que puede ser detectado mediante inspección, análisis o test.
	Evento no desarrollado	Un evento primario que representa parte del sistema pero que no se ha desarrollado todavía.	Una potencial contribución a que ocurra el evento principal, pero falta información para relacionarlos en este momento.
	Evento en "casa"	Un evento que es VERDADERO o FALSO (on/off). Puede ser incluido o excluido del análisis dependiendo de ciertas condiciones.	Un evento controlado por el usuario que permite alternar el estado de este en función de las condiciones del sistema.

Tabla nº14. Clasificación nodos lógicos²⁸

Después de clasificar mediante estos nodos los eventos, expresaremos la relación entre ellos mediante dos tipos de puertas lógicas: Estáticas y dinámicas. Las más comunes las mostramos a continuación:

²⁸ Ver IEC (2006): *Fault Tree Analysis (FTA) IEC International Standard, Documento IEC 61025*

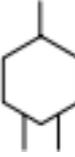
Símbolo y nombre	Descripción	Modelo	Numero de entradas
Puerta NAND 	La consecuencia ocurre si al menos una de las dos entradas no.	$F(t) = \prod_{i=1}^k (1 - Fi(t)) \times \prod_{ij=k}^{n-k} Fj(t)$	≥2
Puerta INHIBIT 	La consecuencia ocurre si las dos entradas se dan y una de las dos condicionalmente	La probabilidad de que ocurra es la probabilidad de ocurrencia de la entrada multiplicada por la probabilidad de ocurrencia de la condición a satisfacer.	2
Puerta OR 	La consecuencia ocurre si alguna de las entradas lo hace	$F(t) = 1 - \prod_{i=2}^n (1 - Fi(t))$	≥2
Puerta AND 	La salida ocurre si todas las entradas son ciertas	$F(t) = \prod_{i=2}^n Fi(t)$	≥2
Puerta VOTO MAYORITARIO 	La salida se cumple si m o más entradas son ciertas	$F(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - F_0(t))^i (F_0(t))^{n-i}$	≥2

Tabla nº15. Clasificación puertas lógicas Estáticas ²⁹

²⁹ Ver IEC (2006): Fault Tree Analysis (FTA) IEC International Standard, Documento IEC 61025

En esta tabla se muestran las puertas lógicas estáticas. Las puertas lógicas estáticas son aquellas que siempre operan del mismo modo independientemente de las entradas. La información que se muestra en la tabla es: por orden de izquierda a derecha: Nombre de la puerta, Descripción, Cómo opera con las probabilidades a su entrada y el Número de entradas.

En la siguiente tabla, y con la misma estructura se muestran las puertas dinámicas. Las puertas dinámicas, al contrario que las estáticas, actuaran de diferente modo dependiendo de la secuencia en la que ocurran sus entradas o dependiendo de la información contenida en estas.

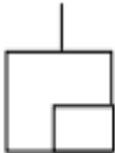
Símbolo y nombre	Descripción	Comentarios	Numero de entradas
Puerta PAND 	El evento ocurre solo si todas las entradas ocurren secuencialmente de izquierda a derecha	Es una buena representación para fallos secundarios que se desprenden de una secuencia de varios eventos. Requiere un análisis de Markov para modelizar su funcionamiento.	≥ 2
Puerta SEQ 	La salida ocurre solo si todas las entradas ocurren secuencialmente de izquierda a derecha y hay mas de dos entradas.	Esta puerta es una extensión de la puerta PAND, que originalmente estaba limitada a dos únicas entradas. Buena representación para reacciones en cadena. Requiere un análisis de Markov.	> 2
Puerta SPARE 	El evento ocurre solo si el numero de repuestos es menor que el requerido	Representación de los repuestos clave y su papel dentro de un evento. Si la distribución de probabilidades es exponencial puede tener una solución directa. Si la probabilidad es constante utilizaremos un análisis de Markov.	≥ 1

Tabla nº16. Clasificación puertas lógicas Dinámicas³⁰

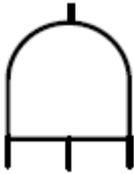
Estas puertas dinámicas requieren normalmente de análisis adicionales para determinar cómo operaran con sus entradas, como modelos de Markov o análisis secuenciales.

Una vez comprendidas todas las puertas lógicas y nodos, veamos un ejemplo de cómo se configura un FTA.

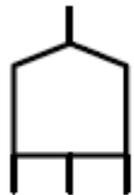
³⁰ Ver IEC (2006): Fault Tree Analysis (FTA) IEC International Standard, Documento IEC 61025

4.2.1.2.- El diagrama de árbol

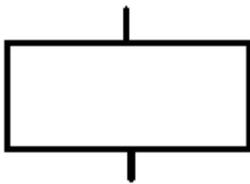
Para el siguiente diagrama solo utilizaremos los nodos y puertas básicos:



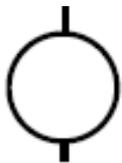
Puerta &: Operamos multiplicando la probabilidad de todas sus entradas. La salida será positiva solo si lo son todas sus entradas.



Puerta O: Operamos sumando la probabilidad de todas sus entradas. La salida será positiva si cualquiera de sus entradas lo es.



Nodo Rectángulo: Evento/Fallo, resultado de otros eventos.



Nodo Círculo: Entradas del sistema, fallos potenciales.

El evento que estudiaremos es que se origine fuego en un tanque que transporta gasolina durante las operaciones de mantenimiento. El tanque habrá sido limpiado anteriormente y se quiere analizar el riesgo que sufren los operarios que deban entrar. Para que el evento ocurra se debe dar la combinación de 3 factores:

- 1- Que haya carburante.
- 2- Presencia de oxígeno.
- 3- Una fuente de ignición

Hay 3 causas potenciales de que haya carburante en el área donde estamos investigando:

- P1- Un vertido accidental. Probabilidad de que ocurra: 10%
- P2- Una fuga en el sistema de transporte. Probabilidad: 2%
- P3- Restos, limpieza del tanque insuficiente. Probabilidad: 9%

Si se diese cualquiera de las 3 sería suficiente, por lo tanto, las conectaremos las 3 a una puerta OR y sus probabilidades se sumarán.

El oxígeno siempre estará presente mientras se realicen operaciones dentro del tanque, por lo tanto, consideraremos solamente un:

P4- Ambiente. Probabilidad: 100%

Por otro lado, hay 3 fuentes de ignición posibles que se pueden dar durante estas operaciones:

P5- Superficies en caliente. Probabilidad: 20%

P6- Electricidad estática. Probabilidad: 5%

P7- Trabajos en caliente. Probabilidad: 10%

Del mismo modo que con la presencia de combustible, es suficiente con una fuente de ignición para que se origine el fuego, por lo tanto, los tres factores de riesgo estarán unidos con una puerta OR y la probabilidad de que ocurran se sumará.

Finalmente, como es necesaria la presencia de Combustible, Oxígeno y Fuente de ignición uniremos las 3 con una puerta & y la probabilidad de los tres se multiplicará.

El Árbol de fallos resultante será:

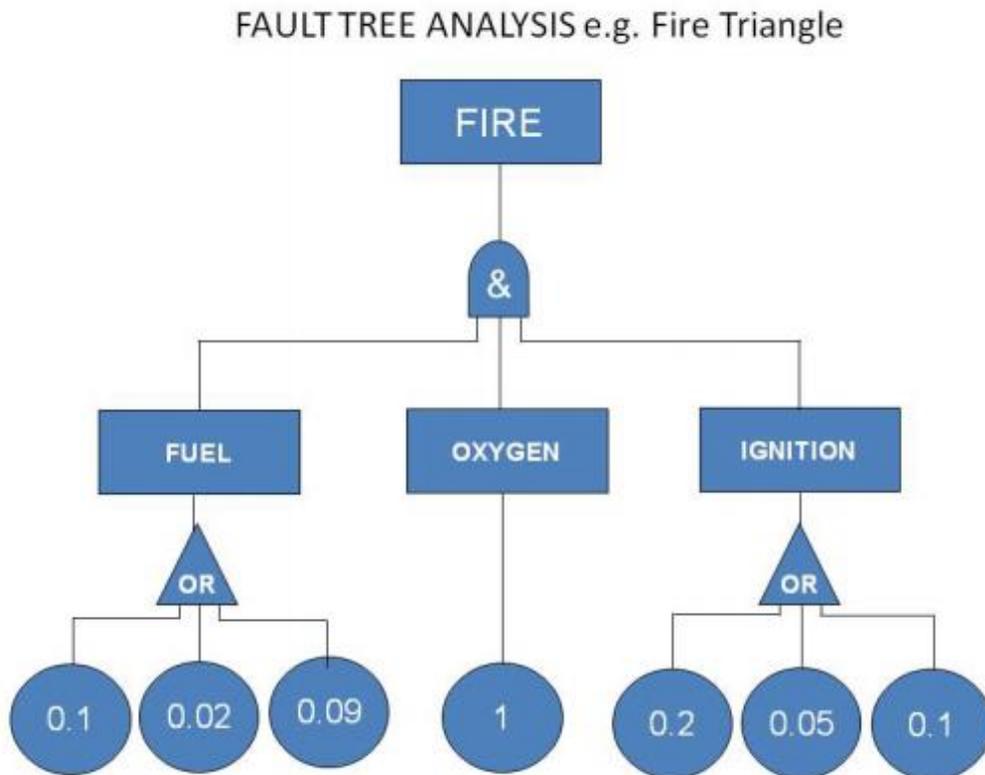


Figura nº16. Árbol de Fallos de un incendio ³¹

³¹ Basado en RCC Training (2016): Identifying Hazards, Assessing and Evaluating Risks, Documento NEBOSH National Diploma Unit A | Managing Health and Safety - Element A3 |

Y si hacemos las operaciones correspondientes a cada puerta lógica, será:

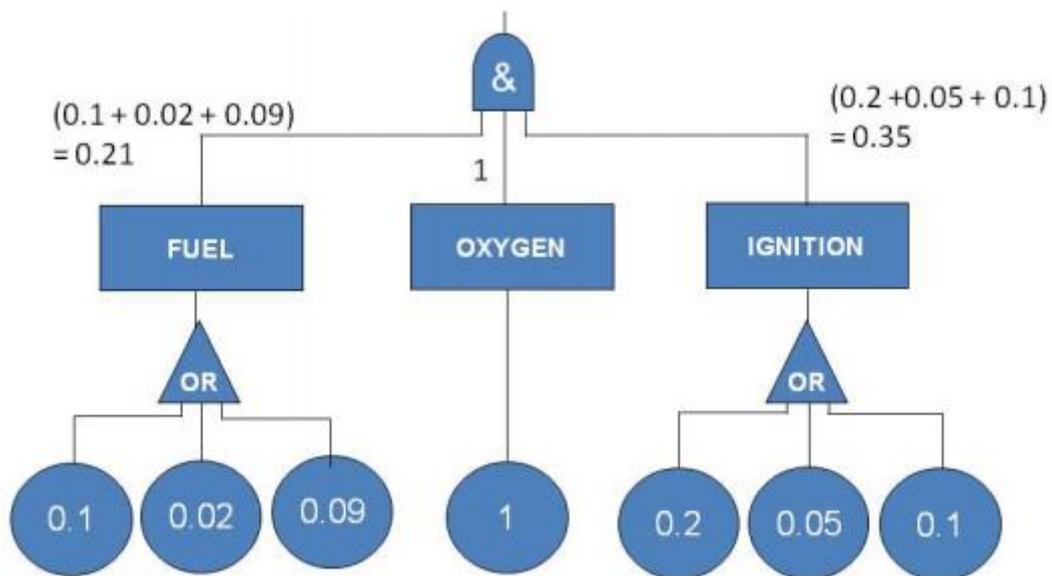


Figura nº17. Árbol de Fallos de un incendio. Calculo de las probabilidades para cada nodo.

Para las probabilidades de cada uno de los factores que puedan ocasionar el fuego. Y:

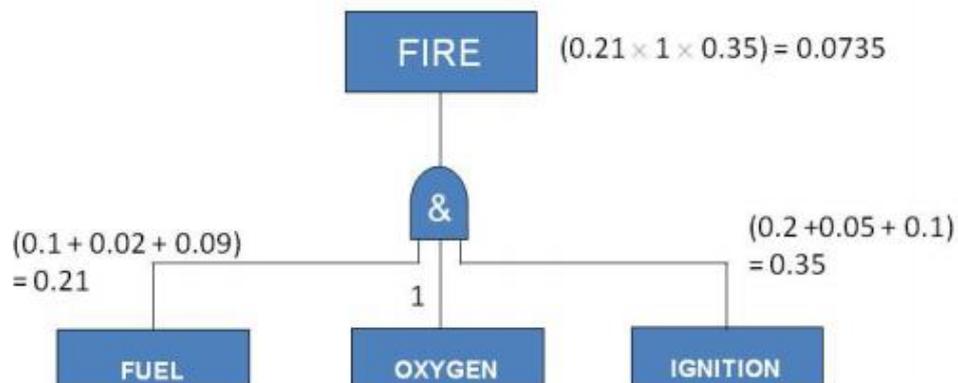


Figura nº16. Árbol de Fallos de un incendio. Calculo final de la probabilidad del incendio.

Después de operar la puerta & que los une los tres. La probabilidad resultante de que se produzca un incendio es de un 7.35%. El peso que tienen los tres son: El que tiene más peso es el oxígeno, luego las fuentes de ignición y luego el combustible.

4.3.- ETA - *Event Tree Analysis*

El *Event Tree Analysis* o Análisis de Árbol de Eventos es un procedimiento inductivo mediante el cual se muestran todas las posibles consecuencias de un evento o riesgo de seguridad en particular teniendo también en cuenta las posibles consecuencias de que fallen las salvaguardas que impiden que se reproduzcan. El ETA se utiliza para identificar todos los escenarios en los que potencialmente se pueden dar accidentes en un proceso complejo.

El ETA se utiliza sobre todo para análisis de seguridad de sistemas tecnológicos de diversas industrias y también para el análisis de los riesgos de los mercados financieros. Mediante el ETA no analizaremos las causas del evento que vayamos a estudiar, sino que se utilizará para determinar la robustez del sistema para mitigar las consecuencias de estos.

Los objetivos del ETA son:

- Identificación de todas las consecuencias que puede comportar el evento estudiado.
- Determinar cómo de confiables son las salvaguardas y medidas de seguridad para reducir el daño potencialmente causado por el evento estudiado.
- Calcular la probabilidad de cada una de estas consecuencias para cada momento de la secuencia. Identificar los pasos más débiles.
- Cuantificar las consecuencias posibles de la ocurrencia del evento estudiado y la propagación del evento durante el tiempo-

El ETA se aplicará también durante cualquiera de las fases del proyecto. En el caso del Eta también es interesante señalar que los eventos a identificar son todos aquellos que podemos detectar como prioritarios dentro de un procedimiento HAZOP. Es útil para analizar cualquier tipo de riesgo de seguridad, pero es especialmente interesante para analizar secuencialmente situaciones de gran complejidad, es decir, que la ocurrencia del evento implique un gran número de pasos.

- Examinar las contenciones de los sistemas de protección de una instalación de manera preventiva, sin haber sufrido un accidente. (Durante su diseño o cuando la instalación ya está funcionando)
- Hallar todas las consecuencias posibles que puede comportar un evento. (Evento ya identificado/ Post accidente o situación de riesgo, independiente de la fase del proyecto)

4.3.1.- Procedimiento de aplicación del ETA

Del mismo modo que para el FTA, veremos la estructura general del desarrollo de un proyecto ETA completo e iremos luego a analizar la metodología concreta para realizar el árbol. En el caso del ETA se realizarán 6 pasos principales:

- 1- Identificar y definir un evento inicial para el estudio de los potenciales accidentes causados por este. Los eventos iniciales señalados deben ser de un riesgo alto. Hay dos fuentes potenciales para la identificación de estos eventos potenciales:
 - a. Eventos identificados después de que se haya causado un accidente en la instalación o eventos que hayan ocurrido en otras instalaciones en las que ha habido un accidente
 - b. Identificados durante un proyecto HAZID o HAZOP. Al necesitar una cantidad de datos importante para después poder cuantificar los riesgos, comúnmente seguirá a la aplicación de un HAZOP, ya que se desarrolla durante fases más avanzadas del proyecto.
- 2- Identificar las barreras que impiden que se desarrollen las consecuencias y los posibles fenómenos que puedan provocar un fallo en estos sistemas. Identificar los posibles escenarios según si funcionan o no las salvaguardas del sistema.
- 3- Construir el árbol de eventos.
- 4- Calcular las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los escenarios potenciales y calcular la probabilidad total de cada uno de los escenarios.
- 5- Definir una criticidad en función de la gravedad de cada uno de los escenarios y su gravedad de ocurrencia.
- 6- Recomendación de acciones correctivas, como hemos visto en todos los otros proyectos, en el caso de que aplique.

4.3.1.1.- El diagrama de decisión

La metodología utilizada para el ETA es más sencilla que la que hemos visto en FTA, de todos modos, veremos brevemente los conceptos necesarios para comprender como se configura.

El ETA se centra en el esquema del diagrama de decisión. El diagrama de decisión se utiliza para mostrar todas las acciones posibles ante un suceso dado, un ejemplo de diagrama de decisión sería:

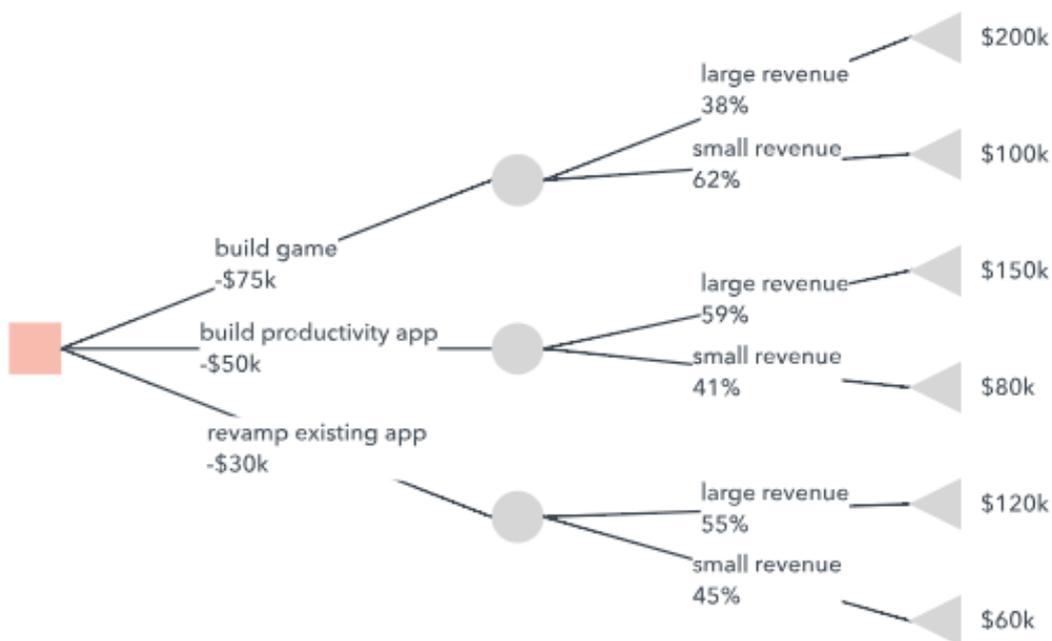


Figura nº18. Ejemplo diagrama de decisión para una estrategia empresarial.³²

En un diagrama de decisión se muestran todas las opciones y las implicaciones de estas en cuanto al resultado esperado de una secuencia de acciones compleja. En el ejemplo que se muestra podemos ver como se mostrarán costes y beneficios de cada una de las acciones, en este caso para calcular los beneficios se sumarán todos los beneficios de cada uno de los caminos. En el caso de que haya eventos que no podamos controlar, como en el caso de los que vamos a estudiar en el ETA, deberemos calcular la probabilidad de ocurrencia de cada una de las opciones. En cada uno de los nodos la probabilidad de ocurrencia y no ocurrencia (fracaso/buen funcionamiento, etc.) deberá sumar 100%, ya que son todos los resultados posibles del nodo, no puede no ocurrir ninguno de ellos.

³² Ver <https://www.lucidchart.com/pages/es/c%C3%B3mo-crear-un-diagrama-de-%C3%A1rbol-de-decisi%C3%B3n>

Además, cada uno de los caminos desde el evento inicial hasta cada uno de los potenciales resultados funcionará como la puerta lógica & del algebra booleana, es decir, para determinar la probabilidad final de que ocurra una de las consecuencias consideradas deberemos multiplicar las probabilidades de que ocurran cada uno de los pasos hasta llegar hasta estas.

En la tabla se muestra un ejemplo simplificado de esto, siendo en cada paso:

$$P(S_n) + P(F_n) = 1$$

por tanto

$$P(S_n) = 1 - P(F_n)$$

Probability of Initiating Event	Probabilities for Component 1	Probabilities for Component 2	Accident sequences probabilities
P(I)	Success state	Success state 1-P(F₂)	P(I)[1-P(F₁)] [1-P(F₂)]
	1-P(F₁)	Failure state P(F₂)	P(I)[1-P(F₁)] P(F₂)
	Failure state	Success state 1-P(F₂)	P(I)P(F₁) [1-P(F₂)]
	P(F₁)	Failure state P(F₂)	P(I)P(F₁) P(F₂)

Figura nº19. Cálculo de probabilidades para el diagrama de decisión.³³

³³ Ver RAGHEB, M. (2013): Event Tree Analysis

4.3.1.2.- El Árbol de Eventos

Ahora veamos cómo se estructura el Árbol de Eventos teniendo en cuenta esta teoría. El ETA se articula normalmente de izquierda a derecha, a la izquierda el evento iniciador i acaba con los accidentes potenciales. En cada paso de la secuencia se pondrán los controles y salvaguardas de los que dispone el sistema por orden cronológico desde que se desencadena el evento iniciador. En cada paso se deberán calcular las probabilidades de cada una de las opciones consideradas dentro del paso de la secuencia estudiado, normalmente estas dos opciones serán que el control o la salvaguarda funcione o no lo haga.

Para continuar con el ejemplo que hemos mostrado en el FTA y configurar así la estructura de un “Bow-tie” completo tomaremos el ejemplo de las consecuencias que puede ocasionar el fuego que hemos visto antes.

En el grafico que vemos a continuación se muestra el ETA de este.

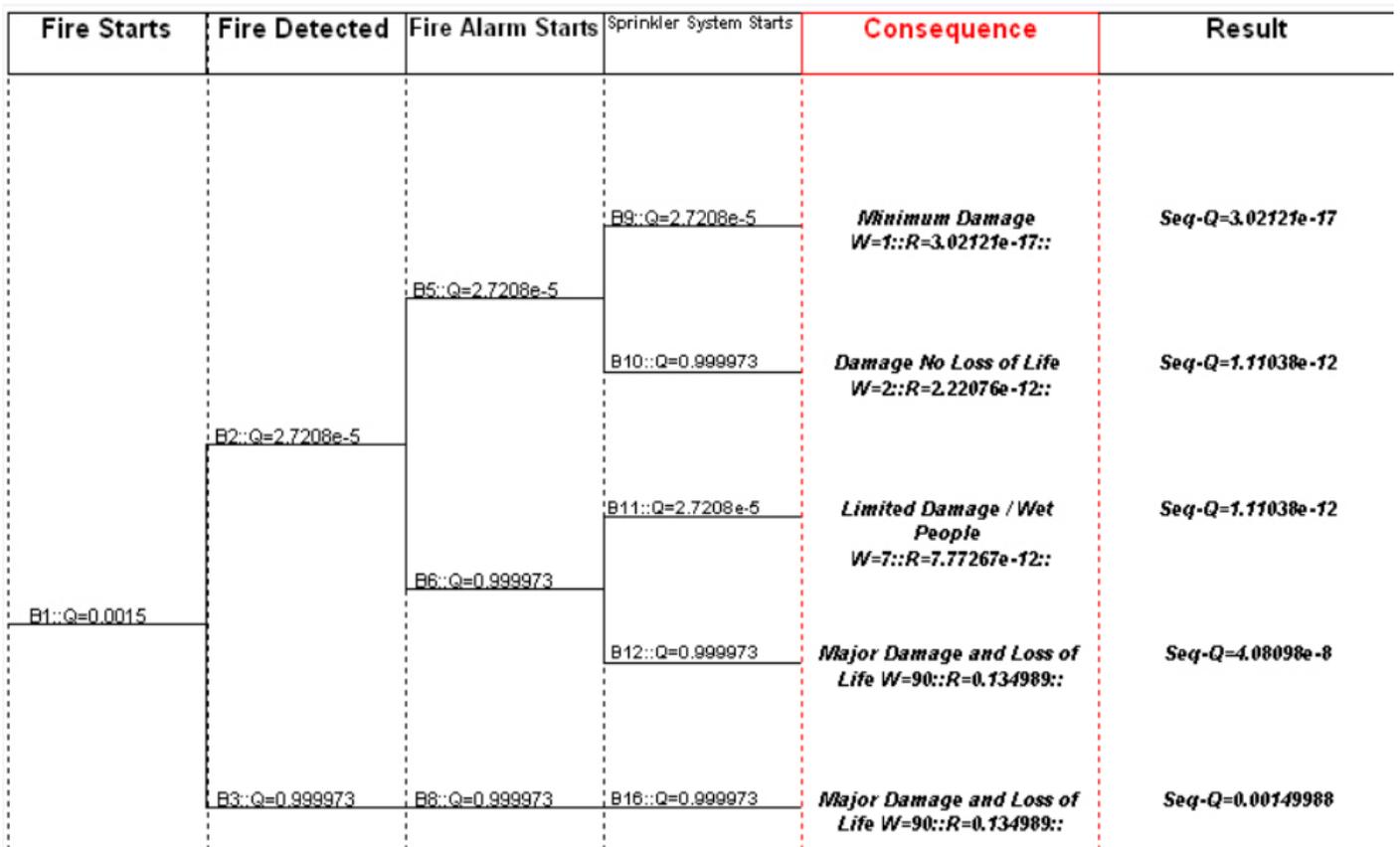


Figura nº20. Ejemplo de Árbol de Eventos para un incendio.³⁴

³⁴ Ver http://www.reliabilityeducation.com/intro_et.html

Como podemos ver se muestran paso por paso la secuencia que se deriva después de que el incendio se ocasione. El primer paso es que el fuego sea detectado o no por algún marino, luego que la alarma de incendio se active y luego que el sistema automático de aspersores se active. En muchos casos, al igual que en este podremos encontrar que la probabilidad de que los controles fallen son muy inferiores a que los controles funcionen.

En el caso de este ETA, en la columna de las consecuencias se incluye también la clasificación de gravedad para cada uno de los escenarios contemplados. En este caso indica este valor con una W a continuación del identificador de cada uno de los escenarios. La conclusión última que podríamos extraer de este ETA es que en caso de quererse robustecer el proceso se deberán poner más salvaguardas adicionales para que en el caso de que todas las contramedidas ya existentes fallen reducir el riesgo (haremos que el resultado obtenido sea menor).

4.4.-El “*bow-tie*” o modelo en pajarita

Estas dos herramientas que hemos analizado estudian partes distintas del evento estudiado, son por lo tanto herramientas complementarias para tratar un mismo evento, y de hecho acostumbramos a utilizarlas las dos juntas, en el siguiente diagrama se muestra la diferencia entre los dos de la que hemos hablado de manera simplificada:

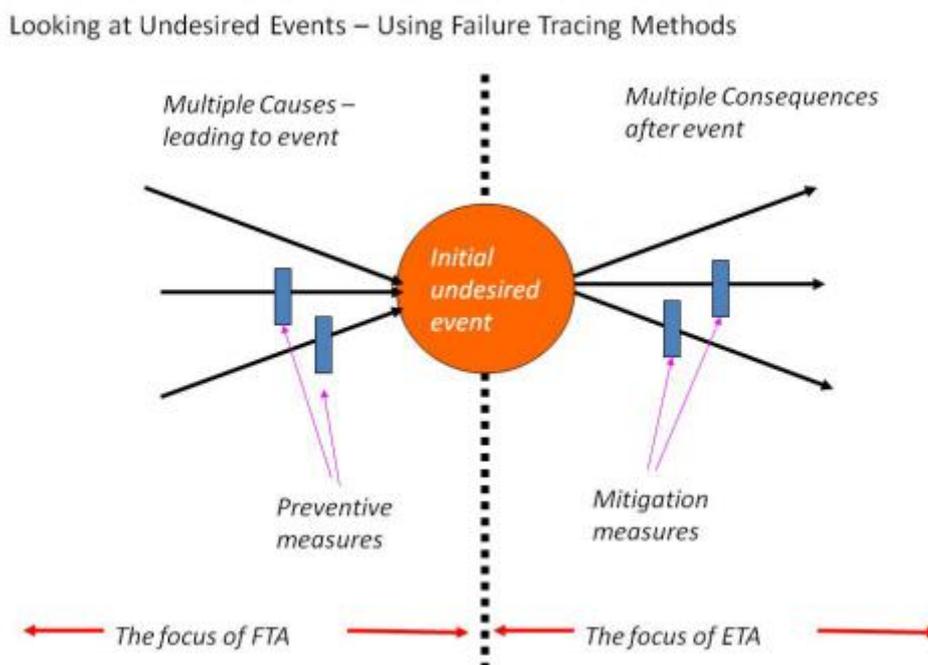


Figura nº21. Esquema para el modelo en pajarita, diferencias entre FTA y ETA ³⁵

³⁵ <https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-ADSAFASS/Fault%20Tree%20Analysis%20and%20Event%20Tree%20Analysis.pdf>

Cuando se aplican las dos herramientas de manera conjunta se le llama un modelo/análisis “*bow-tie*” o de pajarita por la forma del diagrama visto anteriormente que se asemeja a una. Los dos métodos admiten análisis cualitativos dependiendo del evento estudiado, pero el punto realmente interesante sobre estos, como hemos visto, es cuando se aplican desde una óptica cuantitativa. Este análisis se puede aplicar en cualquier fase del proyecto que estemos estudiando, de hecho, estos proyectos se comenzarán cuando se detecten riesgos muy difíciles de trazar y comprender.

5.- CONCLUSIONES

Examinados estos métodos procederemos ahora a hacer un análisis de cómo podríamos cambiar la manera de aplicar las diferentes herramientas que hemos analizado para mejorar los estudios de EFS en los proyectos de instalaciones marítimas, portuarias o buques.

En primer lugar, expondremos las fortalezas y las debilidades de las herramientas trabajadas, y habiendo concretado esta información buscaremos las oportunidades de mejora en ellas.

HAZID-HAZOP. Juicio Crítico

Empezaremos por los proyectos HAZID y HAZOP, dos instrumentos muy similares: estas son técnicas de carácter fuertemente cualitativo. El punto positivo y la razón de ser de que se apliquen estas herramientas para las primeras etapas de la EFS es que nos permiten contemplar muchas más situaciones de las que se han observado en el mismo proyecto y proyectos similares, abriendo la puerta a esa gestión proactiva que persigue la gestión del riesgo marítimo como hemos visto durante la introducción de este trabajo.

Dentro de este contexto contemplar en términos del análisis de riesgo este tipo de situaciones nos permite dar con soluciones a problemas que nunca se han dado anteriormente y avanzar hacia una gestión enfocada en la prevención. El problema del HAZID y el HAZOP es que en estos proyectos hayamos una carencia en general de un análisis de profundidad de los históricos y datos existentes. Esto es, junto con los métodos de análisis moderno como son el *big data* o las inteligencias artificiales (utilizando modelos de análisis discretos) otro modo de hallar relaciones de causalidad entre factores muy variados del proyecto. Gracias a estas relaciones podremos a posteriori hallar problemas en partes del sistema que no se habían considerado como tal, y, por ende, contramedidas mucho más eficientes que sean capaces de atacar distintos problemas al mismo tiempo.

Lo que produce esta falta inicial de detalle es, además un sesgo en el momento de valorar los beneficios del proyecto. Contramedidas que mediante el análisis considerado en HAZID/HAZOP eran señaladas como inviables podrían atacar otros problemas de la instalación y ser mucho más beneficiosas que las consideradas como positivas a nivel de beneficios/costes.

El Modelo AMFE

Veamos ahora el caso del AMFE, un proyecto prácticamente antagónico en su planteamiento al del HAZID y HAZOP y con una metodología muy similar. En este caso el objetivo del AMFE es ser capaz de cuantificar los indicadores para verificar el rendimiento del sistema según diferentes ópticas. Nos hemos centrado en el trabajo en un AMFE enfocado en la seguridad del sistema y no en la calidad del proceso o del producto, pero un gran punto positivo del AMFE es que, si lo aplicamos en todos los ámbitos nos permite tener un estudio más completo del impacto que tiene la aplicación de las contramedidas sobre otros factores del proceso (eficiencia, calidad, etc...), esto en contraposición de los sesgos generados por el uso de HAZID/HAZOP en cuanto al análisis de la viabilidad del proyecto es una mayor ventaja. Al ser una contraparte de los proyectos antes vistos en cuanto a planteamiento los beneficios y las debilidades de estas serán a la inversa. Es una herramienta mixta, es decir, tanto cualitativa como cuantitativa, pero está centrada especialmente en la visión cuantitativa. Ya hemos visto que el punto positivo de esto es la capacidad de análisis más profunda y, por otro lado, la capacidad de correlacionar diferentes partes del proceso que aparentemente no tengan relación entre sí, lo que nos permite desarrollar mejores y más eficientes contramedidas para los riesgos estudiados.

Este planteamiento, pero, se contradice con el planteamiento proactivo del EFS, porque con las técnicas clásicas de análisis sólo se identificarían peligros que ya hayan ocurrido en esta o en otras instalaciones similares, así que es una herramienta que se utiliza en pocas ocasiones y de una manera parcial. La parte negativa es esta misma, que en raras ocasiones se destacan riesgos que no hayan sido observados (aunque no fueran comprendidos cuando se observaron).

Otra fortaleza que representa el AMFE es que es útil para desarrollar herramientas de medición para controlar procesos mientras están funcionando, ya que necesita de una infraestructura que genere grandes cantidades de datos para que sea relevante, lo que no solo será beneficioso para el análisis de seguridad, sino que se podrán utilizar estos datos en otro tipo de proyectos.

La necesaria cuantificación de los peligros

Finalmente, el análisis de árbol de fallos y el árbol de eventos y la unión de los dos, el *bow-tie*. Son herramientas puramente cuantitativas que se centran en, alimentándose de las primeras fases del proyecto (normalmente HAZID y HAZOP como hemos visto) identificar las desviaciones que producen los riesgos identificados y analizar los efectos ocasionados por la ocurrencia de estos la intención es dar con consecuencias que no se hayan detectado para comprobar si esto puede generar un efecto dominó en el que se puedan ocasionar más riesgos. El punto débil de este proyecto es la ausencia de profundidad de los datos de partida. Para funcionar correctamente no debe ser un

ejercicio de abstracción en el que se consideren “posibles” consecuencias. Sino cuantificar los efectos de cada uno de los peligros.

Combinación de Evaluaciones Cuantitativas y Cualitativas

Vistos todos estos puntos nos permitiremos una pequeña reflexión para comprender como hemos llegado a este modelo de evaluación formal de seguridad. En el momento en el que se comenzaron a utilizar estas herramientas era necesaria la tarea especulativa para realizar una evaluación proactiva de estos, por lo tanto, tiene sentido el peso que se le da a las técnicas de tipo cualitativo dentro del planteamiento de la evaluación. No obstante, esta comporta carencias en las fases finales de la evaluación, como hemos visto consecuencias negativas en la evaluación de los árboles de fallos y eventos y, a posteriori, una visión simplista a la hora de realizar el análisis de viabilidad de las medidas propuestas. Con las técnicas y herramientas de la época en el que se desarrolló este estándar, aplicar técnicas cuantitativas para el análisis de causas multimodales de los fallos era tremendamente costoso en recursos y el tiempo en el que se podría realizar el proyecto hubiese sido desmesuradamente largo. Es, por lo tanto, un efecto comprensible en el planteamiento combinarlo con las técnicas cualitativas para agilizar el proyecto y ampliar las situaciones estudiadas.

Las nuevas técnicas

No obstante, en los últimos 20 años hemos avanzado mucho en el análisis masivo de datos y en última instancia se han comenzado a automatizar estos procesos mediante inteligencias artificiales que desarrollan estas relaciones de causalidad discreta de las que hablábamos antes. Además, a nivel teórico si pudiésemos monitorizar absolutamente todos los datos del proceso, aun no poder predecir peligros que no se han dado sí que podríamos observar variaciones anómalas de estos datos, variaciones que no se han dado anteriormente o patrones en estos, y estudiar a partir de aquí las posibles consecuencias mediante un equipo de trabajo. Cubriendo estos posibles fallos que no conocemos, pero dejando de dar palos de ciego planteándonos situaciones que no se puedan dar nunca en la instalación estudiada.

Propuesta final

Todavía no estamos preparados para salvar totalmente esta distancia, por lo tanto, es positivo que el primer análisis que se realice en el proyecto (cuando este esté en fase de diseño) sea un HAZID. Pero si pretendemos avanzar hacia este objetivo, el nuevo paradigma del análisis de seguridad, deberemos centrarnos ampliamente en el desarrollo de métodos de extracción de datos del proceso. Es especialmente interesante que esta tarea se incorpore dentro del HAZID, dado que será mucho más barato implantar estas infraestructuras cuando los proyectos estén en fase de diseño que modificarlos posteriormente. Esto será para poseer los datos suficientes para substituir el uso del HAZOP por un AMFE mucho más técnico y completo. El objetivo final es que el procedimiento del AMFE se realice continua y perpetuamente durante la vida del proyecto. Esto se podría conseguir mediante un estudio masivo de datos (*big data*) inicial que detectase las relaciones de causalidad discretas entre los diferentes indicadores de los que disponemos para así contemplar realmente todos los parámetros que influyan en un riesgo determinado. Luego mediante una inteligencia artificial que detectase continuamente variaciones anómalas de estos parámetros detectaríamos situaciones que todavía no conocemos, subsanando a la vez las carencias del HAZOP para las fases iniciales sin tener que renunciar a un análisis cualitativo en la fase inicial del diseño del proyecto durante la cual es imposible disponer de datos fiables. Finalmente, para las fases finales y a nivel teórico, si contemplásemos todos los datos y las variaciones de estos, el análisis de árbol de eventos y árbol de fallos cubriría totalmente todas las causalidades. La propuesta que se hace para la fase final es, con la misma idea que lo que ya veníamos viendo de las fases iniciales, hacer un gran proyecto que acompañe al HAZID inicial y en el que se cubran posibles fallos teóricos y fallos observados en proyectos antiguos y, posteriormente, realizar pequeños proyectos “*bow-tie*” para cada una de esas relaciones de causalidad halladas durante la aplicación del AMFE y sobre las variaciones de parámetros anómalas identificadas mediante esta inteligencia artificial.

El objetivo de la propuesta es perfeccionar la aplicación de la evaluación formal de seguridad para, de esta manera, que el propio transcurso de esta sea proactivo. Es decir, que sea un proyecto que se desarrolle sobre toda la vida de las instalaciones, y que nunca pare de evolucionar con el análisis de cómo cambia la instalación a lo largo del tiempo.

6.- BIBLIOGRAFÍA

Monografías y artículos:

DEMICHELA, M.- CARMUNCOLI, G. (2014): *Risk based decision-making. Discussion on two methodological milestones*

IEC (2006): *Fault Tree Analysis (FTA) IEC International Standard*, Documento IEC 61025

IMO (2002): *Guidelines for formal safety assessment for use in the IMO Rule-Making Process*, Documento MSC/Circular 1023 MEPC/Circular 392.

IMO (2005): *AMENDMENTS TO THE GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS*, Documento MSC/Circular1180-MEPC/Circular474

IMO (2013): *REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS*, Documento MSC-MEPC.2/Circular5.

KONTOVAS, C.A.- PSARAFTIS, H.N. (2009): *Formal Safety Assessment: A Critical Review*

LIMB, D. (2009): *HAZOP STUDIES – A NEW APPROACH?*

RCC Training (2016): *Identifying Hazards, Assessing and Evaluating Risks*, Documento NEBOSH National Diploma

RAGHEB, M. (2013): *Event Tree Analysis*

RODRIGO DE LARRUCEA, J. (2015): *Seguridad Marítima. Teoría general del riesgo*. Ed. Marge Books

RODRIGO DE LARRUCEA, J. (2017): *El análisis y la gestión del riesgo a partir de la Evaluación Formal de la Seguridad (EFS/FSA): un nuevo modelo de seguridad portuaria*.

RODRIGO DE LARRUCEA, J. (2018) *La investigación en seguridad. Del Titanic a la Ingeniería de la Resiliencia*. Ed. Marge Books

STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING (2011): *HAZOP Guidelines*, Documento *Hazardous Industry Planning Advisory Paper N° 8*

Webs-Fecha consulta:

Todas las páginas de la siguiente lista fueron consultadas durante la fase de estudio previo de este proyecto, es decir, durante los meses de Agosto y Septiembre de 2018.

https://www.researchgate.net/publication/319979143_Risk_Management_Techniques_HAZOP_HAZID_Study

<http://www.oilproduction.net/files/HAZOP-Juan%20Flores%20Ramirez.pdf>

<http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazop-estudiosriesgosoperabilidad>

<http://www.imo.org/es/OurWork/Paginas/Home.aspx>

<http://www.imo.org/en/OurWork/safety/safetytopics/pages/formalsafetyassessment.aspx>

<http://www.imo.org/es/OurWork/Safety/Paginas/Default.aspx>

<http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazid-estudiosidentificacionriesgos>

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf

http://www.halliburton.com/public/project_management/contents/Data_Sheets/web/H011228.pdf

<http://www.progresslean.com/analisis-de-modos-de-fallo-y-efectos-amfe/>

<https://www.lucidchart.com/pages/es/c%C3%B3mo-crear-un-diagrama-de-%C3%A1rbol-de-decisi%C3%B3n>

<http://mragheb.com/NPRE%20457%20CSE%20462%20Safety%20Analysis%20of%20Nuclear%20Reactor%20Systems/Event%20Tree%20Analysis.pdf>

http://www.reliabilityeducation.com/intro_et.html

<https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-ADSAFASS/Fault%20Tree%20Analysis%20and%20Event%20Tree%20Analysis.pdf>

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106078/un%20nuevo%20modelo%20de%20seguridad%20portuaria.pdf>

