
MÓDULO VI: GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y TÉCNICAS AFINES

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

MARÍA VICTORIA IGLESIAS MUÑOZ

eoi

SUMARIO

1.	Introducción	6
1.1.	Definiciones Previas.....	6
1.2.	Análisis de Causas de Accidentes. Sucesos indicadores.	7
1.2.1	Principales enfoques	7
1.2.2	Principales causas de accidentes	9
2.	Técnicas de Identificación de Riesgos	12
2.1.	Introducción a las técnicas de Identificación de Riesgos	12
2.1.1	Preámbulo.....	12
2.1.2	Objetivos de la identificación de escenarios.....	14
2.1.3	Criterios para la selección de los métodos de identificación de riesgos	16
2.1.4	Identificación de riesgos en A. R. y A.C.R.....	20
2.1.5	Identificación de riesgos medioambientales	22
2.2.	Principales Técnicas de Identificación y Análisis de Riesgos..	23
2.3.	Métodos Cualitativos	24
2.3.1	Bases de datos o análisis histórico de accidentes	24
2.3.2	Análisis del riesgo preliminar (PHA)	28
2.3.3	Análisis del What if?	31
2.3.4	análisis mediante Listas de chequeo.....	35
2.3.5	análisis de los modos de fallos y efectos (fmea)	37
2.3.6	Análisis de riesgo y operatividad (HAZOP)	40
2.3.7	Análisis del árbol de fallos.....	45
2.3.8	Análisis del árbol de sucesos	49
2.3.9	Análisis de causa-consecuencia	52
2.3.10.	Análisis del error humano.....	53
2.4.	Métodos Semicuantitativos	56
2.4.1	Análisis de Riesgo con Evaluación del Riesgo Intrínseco	56
2.4.2	Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (FMECA)	58
2.4.3	Índices de riesgo	60
2.5.	Métodos Cuantitativos.....	67
2.5.1	Análisis Cuantitativo mediante árboles de Fallos	72
2.5.2	Análisis Cuantitativo mediante árboles de Sucesos	72
2.6.	Resumen de las técnicas Presentadas	73
2.7	Casos prácticos de identificación de riesgos.....	75
2.7.1	Caso práctico de método de subselección	75
2.7.2	Caso práctico de Árboles de Sucesos.....	80
2.7.3	Caso práctico de Árboles de Fallos	85
2.7.4	Caso práctico de Análisis Hazop.....	94

eoi

eoi

1 INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIONES PREVIAS

Peligro: La capacidad intrínseca de una sustancia peligrosa o la potencialidad de una situación física para ocasionar daños a las personas, los bienes o el medio ambiente.

Riesgo: La probabilidad de que se produzca un efecto específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas.

Daño: La pérdida de vidas humanas, lesiones corporales, los perjuicios materiales y el deterioro grave del medio ambiente, como resultado directo o indirecto, inmediato o diferido de las propiedades tóxicas, inflamables o explosivas y comburentes de las sustancias peligrosas, y a otros efectos físicos o fisicoquímicos, consecuencia de las actividades industriales.

Accidente: Secuencia específica de sucesos imprevistos que tienen o pueden tener consecuencias indeseables sobre las personas, las propiedades o el medio ambiente.

En relación con su magnitud, los accidentes se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios:

- Accidentes localizados: producen efectos en un área muy localizada dentro de la instalación industrial.
- Accidentes graves, es decir, *"Cualquier suceso, tal como una emisión en forma de fuga o vertido, incendio o explosión importante, que sea consecuencia de un proceso no controlado durante el funcionamiento de cualquier establecimiento, que suponga una situación de grave riesgo, inmediato o diferido, para las personas, los bienes y el medio ambiente, bien sea en el interior o exterior del establecimiento y en el que estén implicadas una o varias sustancias peligrosas"* (R.D. 1254/99)
- Accidentes catastróficos: accidentes a los que se asocian grandes distancias de consecuencias, tales como explosiones de gran magnitud, grandes nubes tóxicas, etc.

Incidente: Acontecimiento no deseado que, bajo circunstancias diferentes, podría resultar en daño a las personas, propiedades o medio ambiente.

Suceso iniciador: Evento interno o externo anómalo que puede conducir a un accidente

Desarrollos accidentales: Cada uno de los sucesos finales a evaluar. Se corresponde fundamentalmente con jet fire, pool fire, BLEVE, flash fire, UVCE, CVE y nubes tóxicas.

Escenario: Conjunto de condiciones tales como punto de fallo, diámetro de la fuga, temperatura, presión, composición, así como el resto de condiciones que permiten caracterizar un accidente determinado.

Consecuencias: Se refiere a la medida de los efectos esperados de un escenario concreto.

Frecuencia: Es el número de veces que ocurre un hecho por unidad de tiempo.

En la determinación del riesgo se combinan las consecuencias y la probabilidad de ocurrencia de cada escenario de accidente identificado y seleccionado en una instalación. Para calcular el riesgo se combinarán las consecuencias y la probabilidad de ocurrencia de los escenarios seleccionados.

La identificación de riesgos es un punto crítico en la determinación del riesgo. Un peligro omitido es un peligro no analizado.

A lo largo del presente texto se emplean indistintamente los términos de riesgo, peligro, accidente o escenario, en base a la tradición existente en el uso de tales términos en la bibliografía especializada, lo que no debe llevar a considerar como similares tales conceptos.

1.2. ANÁLISIS DE CAUSAS DE ACCIDENTES. SUCESOS INDICADORES.

1.2.1 PRINCIPALES ENFOQUES

Existen diferentes técnicas a la hora de abordar la identificación de las causas generadoras de accidentes. Se pueden considerar diferentes enfoques a la hora de abordar las técnicas que pueden resumirse de la siguiente manera:

- a) Técnicas que parten de la ocurrencia del accidente, determinando sus causas básicas. Su principal exponente lo constituye la técnica del **árbol de fallos**. Su principal aplicabilidad es la determinación de cada una de las causas básicas, con objeto de priorizar la aplicación de medidas correctoras, así como de cuantificar la probabilidad de que ocurra el accidente en base a la probabilidad de fallo de cada una de las causas básicas.
- b) Técnicas que parten de la ocurrencia del suceso inicial, determinando los diferentes desarrollos accidentales. Su principal exponente lo constituye la técnica del **árbol de sucesos**. Su principal aplicabilidad es la determinación de las diferentes evoluciones accidentales, así como la influencia de las medidas correctoras o actuaciones del sistema en los sucesos finales a evaluar, pudiendo incorporar un análisis probabilístico de los mismos.
- c) Otras técnicas complementarias. Dentro del resto de técnicas de investigación de causas de fallo, destacamos por su grado de utilización, fundamentalmente en el ámbito de la seguridad laboral:
- El *método FINE* (o índice del Grado de Peligrosidad). Su utilización principal se centra más que en la identificación de los riesgos en la evaluación de los mismos, mediante una escala de graduación muy simple que permite priorizar las acciones correctoras que resulte preciso adoptar para evitar/mitigar dichos riesgos.
 - El *Modelo de Causalidad de Pérdidas* (también denominado Systematic Cause Analysis Technique, SCAT). Se trata de un enfoque fundamentalmente científico-metodológico, pero de relativa utilidad práctica. Según este enfoque, el accidente o incidente se produce como resultado de la concatenación de 5 tipos de causas:
 - Pérdida de control (Ineficaz sistema de control).
 - Causas básicas (Errores humanos o/y organizativos).
 - Causas inmediatas (actos o condiciones subestándares).
 - Incidente (contacto con sustancias o energía).
 - Pérdida (daño a persona, material o medio ambiente).

Por último es interesante destacar que se han sucedido diferentes tendencias a lo largo de los años acerca de dónde hacer recaer el peso de las causas de los accidentes. Así, inicialmente se centraba en los aspectos materiales, lo que llevó a desarrollar sistemas de seguridad cada vez más

precisos. Con los años se fue ampliando el campo a los temas relacionados con el papel del hombre en todo accidente: desde el error humano, en un principio, hasta los fallos achacables a deficiencias de gestión.

Para valorar la importancia de este último enfoque, baste indicar que la reglamentación sobre accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (Directiva SEVESO II, traspuesta en España al R.D. 1254/1999) incluye entre sus obligaciones la necesidad de desarrollar un Sistema de Gestión de Prevención de Accidentes Graves.

1.2.2 PRINCIPALES CAUSAS DE ACCIDENTES

Con independencia del enfoque escogido para el análisis de las causas, y de la interrelación que pueda considerarse entre las mismas, pueden considerarse las siguientes causas genéricas de accidentes industriales de origen químico:

- Fallos de componentes.
- Desviaciones de las condiciones normales de operación.
- Errores humanos y de organización.
- Injerencias de agentes externos al proceso.
- Fuerzas naturales.
- Actos dañinos intencionados o de sabotaje.

A continuación, se describen brevemente algunas de estas causas:

1. Fallos de componentes

- Diseño inapropiado frente a presión interna, fuerzas externas, corrosión del medio y temperatura.
- Fallos mecánicos de recipientes y conducciones debidos a la corrosión externa o a impactos.
- Fallos de elementos tales como bombas, compresores, ventiladores y agitadores.
- Fallos del sistema de control (sensores de presión y temperatura, controladores de nivel, reguladores de flujo, unidades de control, procesos computerizados).
- Fallos de sistemas de seguridad (válvulas de seguridad, discos de ruptura, sistemas de alivio de presiones, sistemas de neutralización).

- Fallos de juntas y conexiones.

2. Desviaciones de las condiciones normales de operación

- Fallos en el control de los parámetros fundamentales del proceso (presión, temperatura, flujo, concentraciones) y en el tratamiento de los mismos.
- Fallos en la adición de componentes químicos.
- Fallos en los servicios, tales como:
 - Agua de refrigeración, para reacciones exotérmicas.
 - Insuficiente aporte de medio calefactor o de vapor.
 - Corte del suministro eléctrico.
 - Ausencia de nitrógeno.
 - Ausencia de aire de instrumentación o aire para agitación.
- Fallos en los procedimientos de parada o puesta en marcha.
- Formación de subproductos, residuos o impurezas, causantes de reacciones colaterales indeseadas.

3. Errores humanos y de organización

- Errores de operación (válvula errónea, botonera incorrecta).
- Desconexión de sistemas de seguridad a causa de frecuentes falsas alarmas.
- Confusión de sustancias peligrosas.
- Errores de comunicación.
- Incorrecta reparación o trabajos de mantenimiento.
- Trabajos no autorizados (soldadura, espacios confinados).

Los errores humanos suceden porque:

- Los operarios no conocen suficientemente los riesgos y su prevención.
- Los operarios están insuficientemente adiestrados en el trabajo.
- Se espera demasiado de los operarios de proceso.

4. Injerencias de agentes externos al proceso

- Transporte de materias peligrosas (carretera, ferrocarril,...).
- Carga de sustancias inflamables / explosivas.
- Tráfico aéreo.
- Proximidad a instalaciones peligrosas.
- Impactos mecánicos como proyectiles.

5. Fuerzas naturales

- Viento.
- Desbordamiento de cauces fluviales.
- Terremoto.
- Heladas.
- Calores extremos.
- Incendios.

6. Actos dañinos intencionados o de sabotaje

- Personal interno / personal foráneo.

Una vez indicadas las principales causas generadoras de accidente, veamos las principales técnicas de identificación de riesgos utilizados en la identificación de riesgos, con aplicabilidad para Estudios de Seguridad, Planes de Emergencia Interior y Análisis Cuantitativo de Riesgos.

2 TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

2.1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

2.1.1 PREÁMBULO

Seguidamente se repasan las técnicas más empleadas en la identificación de escenarios de accidente y situaciones peligrosas en plantas químicas. El propósito de la utilización de estos métodos puede ser:

- Reconocer las **situaciones peligrosas** en actividades en las que se manejan materiales que implican riesgos, **con objeto de revisar el diseño y establecer medidas correctoras o preventivas.**
- Identificar los **escenarios de posibles accidentes**, con el fin de evaluarlos y cuantificarlos en un análisis de riesgos.

Los procedimientos de identificación de riesgos podrán ser aplicados durante todas las fases del proyecto, es decir, durante el diseño, la construcción, la operación, así como para otro tipo de requerimientos en instalaciones industriales.

La correcta identificación de escenarios no sólo permitirá tener un fiel reflejo de los aspectos de seguridad propios de la instalación, sino que además permitirá eliminar aquellos puntos más conflictivos. En la Figura 2.1 se facilita un esquema general de la importancia que tiene la identificación del riesgo en una evaluación que trate de predecirlo y/o reducirlo.

Dada la gran variedad de técnicas que se presentan, no cabe hablar de una técnica predominante frente a las demás. La técnica seleccionada dependerá de los propósitos perseguidos con la identificación de escenarios, el grado de conocimiento que se tenga de ésta, así como de los datos y recur-

sos disponibles. En cualquier caso, no se llegará a conseguir una adecuada identificación de escenarios sin el juicio de expertos en Seguridad Industrial y el apoyo de técnicos familiarizados con las operaciones y plantas involucradas.

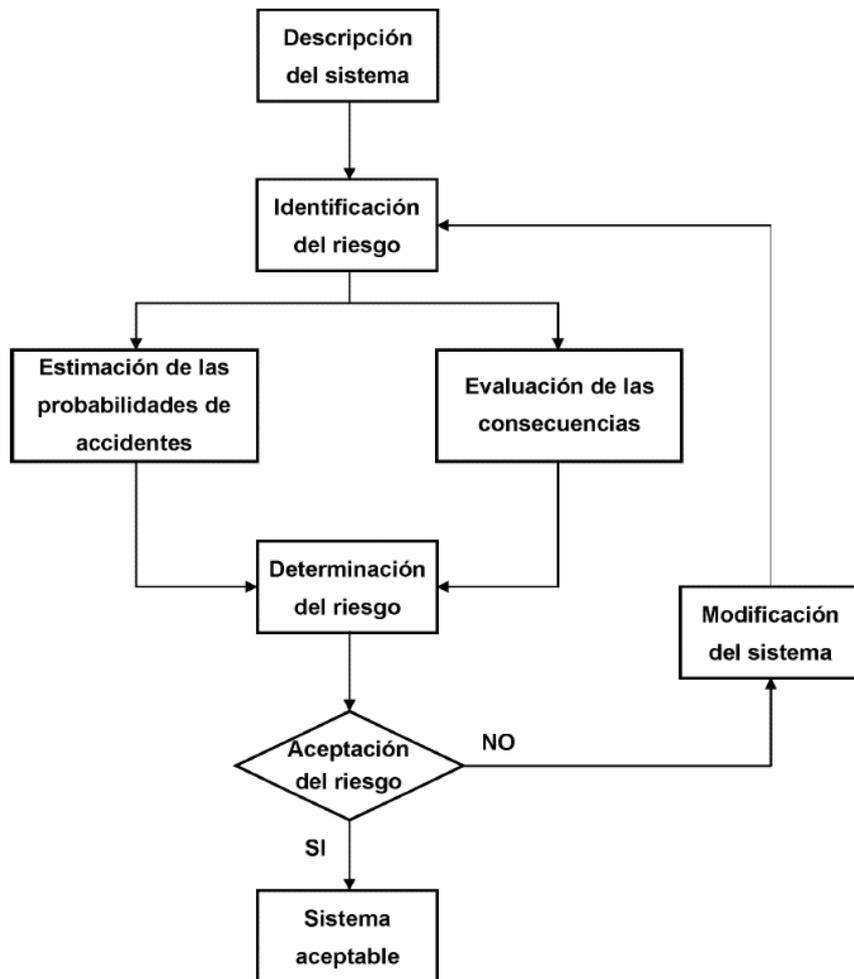


FIGURA 2.1. EVALUACIÓN PREDICTIVA DEL RIESGO

2.1.2 OBJETIVOS DE LA IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS

Tal como se ha señalado anteriormente, los objetivos de la identificación de escenarios pueden ser muy variados:

1. Investigación de valores límites de consecuencias.

Para ello, se seleccionarían los peores accidentes de entre los creíbles (Worst Credible Accident), que determinarían valores límite en relación con los efectos asociados a accidentes que puedan ocurrir en una instalación industrial, con objeto de fijar la aplicabilidad de estudios posteriores.

2. Evaluación de medidas de prevención del riesgo.

Para tal fin, lo más adecuado será usar listas extensivas de accidentes, reemplazables por listas de accidentes representativos en aquellos casos en los que exista una gran complejidad para abordar la primera.

3. Aplicación de medidas correctoras de reducción del riesgo.

Dada la generalmente limitada disponibilidad de recursos existentes, las medidas correctivas de reducción del riesgo se aplicarán a los seleccionados tras la aplicación de índices que sirvan para priorizar las medidas correctoras.

4. Estimación de riesgos económicos.

Aun cuando no existan riesgos graves sobre los trabajadores o la población, cualquier accidente puede generar graves consecuencias económicas en las instalaciones, bien por pérdidas de equipos, o bien por días de trabajo, lo que tiene especial trascendencia para las aseguradoras. Para ello, se seleccionan accidentes del tipo catastrófico.

5. Evaluación del riesgo sobre empleados.

Aunque la aplicación de listas extensivas puede resultar más apropiada, por lo general la identificación de accidentes pertenecientes al grupo de los representativos, e incluso los más desfavorables, puede ser suficiente. No obstante, cabe indicar que existen técnicas de identificación de riesgos concebidas específicamente para tal fin, fundamentalmente el módulo FINE.

6. Evaluación del riesgo sobre la población.

Los riesgos sobre la población deben ajustarse a las directrices marcadas por la administración competente. Para la evaluación del nivel de riesgo generado por una instalación industrial, se hará uso de una lista de accidentes representativos. En cualquier caso, la elección de escenarios se realizará en función del ámbito del estudio: Estudio

de Seguridad, Plan de Emergencia Interior o Análisis Cuantitativo de Riesgos.

En relación a los procedimientos internos de emergencia, se precisa identificar accidentes de todas las categorías, que puedan generar todo tipo de fenómenos.

TABLA 2.1
SELECCIÓN DE ACCIDENTES SEGÚN EL PROPÓSITO DEL ESTUDIO

CARACTERÍSTICAS	NÚMERO DE ACCIDENTES A SELECCIONAR
Se tienen que identificar los accidentes que más contribuyen al riesgo.	Es necesario estudiar una lista exhaustiva de accidentes o al menos un grupo representativo de ellos.
Ha de comprobarse el cumplimiento con los límites fijados para los trabajadores.	Normalmente, los accidentes catastróficos no suelen contribuir en gran medida al riesgo total para los empleados. Se debe seleccionar una lista exhaustiva de accidentes con efectos de corto y medio alcance.
Se tiene que comprobar el cumplimiento con los límites fijados por las autoridades.	Se debe seleccionar un grupo representativo de los accidentes con consecuencias para el exterior (catastróficos).
Se han de estimar las zonas de vulnerabilidad para la planificación de las emergencias.	Normalmente, un grupo limitado de accidentes suele bastar para este propósito. Este grupo debe incluir los peores accidentes creíbles y/o posibles (WCA y/o WPA).

2.1.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Tal como se ha indicado, existen múltiples técnicas de identificación de accidentes en plantas de proceso, cada una con ciertas peculiaridades que hacen que su aplicación resulte más ventajosa en unas circunstancias u otras. Además, puede ocurrir que las áreas de una instalación compleja presenten características que hagan aconsejable el uso de determinadas técnicas.

A continuación se resumen algunos criterios de selección:

1. Fase de desarrollo de la planta o proceso.

Aunque la fase de diseño es esencial en la evaluación de riesgos, también merecen atención las fases de arranque, operación y parada. En muchos casos, lo más conveniente será identificar los riesgos importantes tan pronto como sea posible, evitando costes de rediseño y modificación.

A dicha evaluación previa, le seguirá un análisis detallado de la instalación tan pronto como se conozcan las condiciones principales y el diseño de las líneas del proceso.

2. Niveles potenciales de consecuencias.

La evaluación de la situación más desfavorable dará lugar a los niveles más conservadores de riesgo, que podrá justificar la elección de un estudio en mayor o menor profundidad.

3. Complejidad de la planta o proceso.

El grado de complejidad de la planta o proceso podrá condicionar la elección de la técnica seleccionada. Las plantas que desarrollen un proceso de alta complejidad, y precisen, por tanto, de un complicado sistema de seguridad, requerirán estudios en profundidad. Dichos estudios, en cualquier caso, serán rentables considerando el costo asociado a dichas medidas de seguridad, al centrarlas en los puntos con mayor nivel de riesgo.

4. Experiencia del personal: grado de conocimiento de las técnicas.

La experiencia del personal en el uso de una determinada técnica, resultará esencial para un buen estudio. En general, será más apropiado emplear un método sencillo bien conocido, que tratar de utilizar un método más complejo del que no se tenga experiencia.

5. Información y datos requeridos o disponibles.

Algunas de las técnicas requieren un mayor volumen de datos, los cuales no siempre estarán disponibles. Si un sistema está escasamente documentado, o sólo está diseñado en su fase preliminar, resultará poco efectivo, y de difícil realización, el intentar aplicar una detallada evaluación del riesgo.

6. Requerimientos de tiempo y costo.

Aunque el tiempo y el costo no deben ser los factores más determinantes al realizar una identificación de riesgos, los recursos empleados deben estar de algún modo en relación con el coste de las modificaciones a introducir en la planta para reducir el riesgo.

A este respecto, la mayoría de los estudios resultarán rentables si se realizan o coordinan por analistas con experiencia.

A continuación se presenta la Tabla 2.2, donde se recogen las diferentes técnicas de identificación, así como los parámetros en base a los que se deben seleccionar.

Los parámetros de selección serán:

- Fase de la planta o proceso. Se distinguirá entre:

- D: Diseño
- C: Construcción
- A: Arranque
- O: Operación
- P: Parada
- M: Modificación

- Propósito. Los propósitos serán conocer:

- T: Fallos técnicos
- O: Fallos en operación

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

- H: Fallos humanos
 - C: Grado de consecuencias
- Tipo y naturaleza de los resultados:
- Q_i: Cualitativos
 - Q_n: Cuantitativos
 - R_r: Herramienta para reducir riesgos
- Complejidad del sistema:
- B: Baja
 - M: Mediana
 - A: Alta
- Requerimientos de personal:
- P: Especialistas de planta
 - S: Especialistas en seguridad
- Requerimientos de datos:
- G: Globales
 - I: Intermedios
 - D: Detallados
- Requerimientos de tiempo y costo:
- B: Bajos
 - M: Moderados
 - A: Altos

TABLA 2.2
SELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

TÉCNICA DE IDENTIFICACIÓN	FASE DE LA PLANTA O PROCESO	PROPÓSITO	TIPO DE RESULTADO	GRADO DE COMPLEJIDAD	REQUERIMIENTOS	
					Personal	Datos Tiempo y costo
Listas de chequeo.	D+C+A+O+P+M	T+O+H	Q _i	B-M	P	G+I B-M
Revisión de seguridad.	D+O	T+O+H	Q _i +R _r	M-A	P+S	D M-A
Indicadores de riesgo.	D+O	T+C	Q _i +Q _n	B-M	P+S	G+I M
Análisis del riesgo preliminar.	D (1ª Fase)	T+C	Q _i +R _r	B-M-A	P	G+I M
Análisis ¿Qué sí?	D+A	T+O+H+C	Q _i +R _r	B-M	P+S	D+I B-M
HAZOP.	D+O	T+O	Q _i +R _r	M-A	P+S	D A
FMECA.	D+C+O	T	Q _i	M-A	P+S	D M-A
Arbol de fallos.	D+O	T+H+C	Q _i +Q _n	M-A	S	D M-A
Arbol de sucesos.	D+O	T+H+C	Q _i +Q _n	M-A	S	D M-A
Análisis causa-consecuencia.	D+O	T+H+C	Q _i +Q _n	M-A	S	D M-A
Análisis del error humano.	D+C+O	H+C	Q _i +R _r +Q _n	M-A	S	D+I M-A
Análisis del MCA.	D+O	C	Q _n	B-M	S	G B-M
Bases de datos.	D+C+A+O+P+M	T+O+H+C	Q _i +Q _n	B-M	S	G M

En definitiva, de la Tabla 2.2 s pueden extraer algunas conclusiones:

- El análisis HAZOP se considera un método muy completo, ampliamente utilizado sobre todo en plantas de proceso, que permite identificar sucesos iniciadores asociados a las desviaciones de operación, proceso y sucesos externos, por lo que su uso se considera preferente para plantas de proceso, de riesgo intrínseco elevado, o para el caso de diseños nuevos.

- El análisis histórico de accidentes se considera un método general que no requiere muchos recursos y que, por tanto, se recomienda como punto de partida para prácticamente todos los casos. En instalaciones de diseños nuevos su aplicación se ciñe más a las características de las sustancias que a las de operación, ya que no existe experiencia operativa de referencia en la nueva instalación. Su mayor utilidad reside en instalaciones de productos con amplia difusión, como productos energéticos, productos químicos de base, etc.

. Para instalaciones con un elevado número de áreas, como refinerías, por ejemplo, se recomienda realizar un análisis del tipo de índices de riesgo, para identificar las áreas de mayor riesgo de la instalación. A estas áreas se les deberá aplicar posteriormente métodos más precisos para un estudio más profundo, ya que los índices de riesgo sólo dan una estimación orientativa del riesgo.

2.1.4 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN A. R. Y A.C.R.

Tal como se ha indicado, la selección de escenarios destinada a Análisis de Riesgo (A.R.) a incluir en los Informes de Seguridad (I.S.) o Análisis Cuantitativos de Riesgos (A.C.R.) se realizará fundamentalmente en base a la lista de accidentes representativos. Sin embargo, hay que hacer las siguientes premisas:

- Si el Análisis de Riesgo se concibe de manera independiente del Plan de Emergencia Interior (P.E.I.), se podrá realizar una selección de escenarios basada fundamentalmente en los accidentes mayores.

- A la hora de abordar un P.E.I., se deberán identificar además escenarios que, si bien no son catalogables como accidentes mayores, sí tendrán influencia sobre la activación de procedimientos de emergencia.

- Los A.C.R. requieren una identificación de escenarios algo más exhaustiva, debido fundamentalmente a la importancia que pueden llegar a tener en los niveles de riesgo en el interior de la planta, aquellos ac-

cidentes con consecuencias calificables como no muy graves pero con alta probabilidad de ocurrencia. En este caso, la lista de accidentes representativos no bastará, y se tomarán otros pertenecientes a las categorías de accidentes mayores, así como los más probables de los localizados.

Esto será especialmente aplicable en aquéllos casos en los que las zonas habitadas estén muy próximas a la instalación industrial.

En cualquier caso, es de destacar la gran influencia que tendrá la correcta identificación de escenarios en los resultados finales, por cuanto la omisión de escenarios de graves consecuencias y frecuencia no despreciable hará inútiles los esfuerzos y dedicación empleados en las técnicas de cuantificación de efectos y consecuencias sobre los demás escenarios identificados. Se debe, por tanto, vigilar que estos accidentes críticos, que afectan sustancialmente al nivel de riesgo, no sean omitidos del estudio.

Por último, la identificación de escenarios de accidentes, tal como se verá en los apartados correspondientes a árboles de fallo, sucesos y análisis causa-consecuencia, debe completarse con el análisis de los fenómenos ocurridos a raíz de éste, dado que el estudio de los posibles desarrollos de accidentes derivados del suceso iniciador, puede llegar a determinar accidentes englobados bajo la categoría de localizado a la de catastrófico.

En definitiva, la operativa a seguir al aplicar una identificación de riesgos puede constar de lo siguiente:

- Aplicación de una técnica de índice de riesgo, para centrar la atención sobre las instalaciones y equipos más críticos del sistema.
- Una vez seleccionado el equipo en cuestión, aplicará una técnica como HAZOP, FMECA, What if o Lista de Chequeo para determinar el fallo concreto.
- La determinación de los sucesos finales que puede generar o de sus causas básicas se apoyará en los árboles de sucesos o fallo, respectivamente.

Es evidente que este procedimiento se realizará en mayor o menor medida en función del esfuerzo y tiempo disponibles, así como de la complejidad de la instalación y en definitiva, de los recursos que se vayan a emplear en la realización del análisis. Aun así, es importante resaltar la importancia de esta fase en el resultado del análisis, por lo que no se deberán escatimar recursos en ella.

2.1.5 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS MEDIOAMBIENTALES

En la Evaluación de Riesgos Medioambientales la etapa de identificación tiene por objeto determinar los episodios contaminantes relevantes que se pueden originar en la actividad industrial y que derivan en la exposición de los elementos vulnerables del entorno a agentes químicos o efectos físicos.

En este sentido, en la etapa de identificación es importante contemplar los episodios contaminantes que pueden tener su origen, entre otras causas, en:

- **Situaciones episódicas contaminantes derivadas de accidentes** en las que se ven involucradas sustancias que por su carácter contaminante alteren los niveles de calidad ambiental en el entorno de la instalación.
- **Situaciones episódicas contaminantes derivadas de incidentes**, ocasionados por fallos operacionales como consecuencia del mal funcionamiento o averías, tanto en la operación de unidades, como en los equipos de control y corrección de emisiones, vertidos líquidos y gestión de residuos, que originen vertidos contaminantes anormales.
- **Situaciones episódicas contaminantes derivadas de emisiones fugitivas de sustancias contaminantes**, asociadas a fallos en los sistemas de sellado de bombas y compresores, a fugas en bridas, en elementos de instrumentación y en válvulas, a picaduras de soldaduras, y a operaciones incorrectas de toma de muestras.
- **Períodos de funcionamiento transitorio**, originados como resultado de operaciones periódicas (arranques, soplado de hornos, operaciones de drenado de equipos, etc.), que si bien no son catalogables como accidentes o incidentes, en determinadas condiciones pueden dar lugar a elevadas concentraciones de sustancias contaminantes en el entorno.

2.2. PRINCIPALES TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS

Las distintas Técnicas pueden agruparse en tres grupos fundamentalmente:

- a) **Métodos Cualitativos:** Tienen como objetivo establecer la identificación de los riesgos en el origen, así como la estructura y/o secuencia con que se manifiestan cuando se convierten en accidente. Se verá más adelante que realizan un escrutinio (más o menos conducido, estructurado y/o secuencial) del proceso y del equipo incluidos en la planta o unidad objeto de consideración. En ocasiones son preliminares y sirven de soporte estructural para los estudios cuantitativos.
- b) **Métodos Semicuantitativos:** Pretenden mediante la combinación de unos factores globales (penalizadores o bonificadores) de riesgo establecer directamente el riesgo (R) o la severidad (S). Casi siempre conducen a resultados globales y relativos que sirven para comparar riesgos procedentes de plantas industriales diversas pero concretas (por ejemplo: dos refinerías de petróleo con unidades, equipos y capacidades dados y diferentes; un mismo proceso en dos versiones diferentes; una misma planta antes y después de modificaciones, etc.). Los factores de riesgos y las escalas para enjuiciarlos proceden de la experiencia en casos similares al que se estudie.
- c) **Métodos Cuantitativos:** Tienen como objetivo recorrer completo el tracto de la evolución probable del accidente desde el origen (fallos en equipos y/a operaciones) hasta establecer la variación del riesgo (R) con la distancia, así como la particularización de dicha variación estableciendo los valores concretos de riesgo para los sujetos pacientes (habitantes, casas, otras instalaciones, etc.) situados en localizaciones a distancias concretas.

2.3. MÉTODOS CUALITATIVOS

Se trata de técnicas de análisis crítico que no recurren al análisis numérico. Su objetivo principal es identificar:

- a) Riesgos
- b) Efectos: incidentes y accidentes cuando se materializan los riesgos.
- c) Causas: orígenes o fuentes de los riesgos.

Emplean diferentes herramientas lógicas y auxiliares.

Algunos de ellos establecen estructuras lógicas secuenciales, causas/riesgos/efectos que, además de identificar, sirven como trama para análisis semicuantitativos o cuantitativos posteriores.

En otros casos, el barrido sistemático de causas/riesgos/efectos conduce a detectar parte de los sistemas (de proceso, de instrumentación de equipo, etc.) que, por ser complejas y/o delicadas, requieren el análisis mediante métodos más penetrantes o más cuantitativos.

Dado que los análisis cuantitativos sirven, muchas veces como base para otros semicuantitativos o cuantitativos, es importante la calidad en los primeros.

A continuación se describen algunos de los métodos cualitativos más frecuentemente utilizados.

2.3.1 BASES DE DATOS O ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES

Aplicación

Una de las técnicas de identificación de accidentes más normalmente utilizada son las bases de datos de accidentes. Mediante esta técnica se podrá tener acceso a los accidentes más frecuentemente ocurridos en relación con un proceso determinado o una sustancia peligrosa involucrada, conociendo sus causas, sus consecuencias y en base a ellos establecer recomendaciones y conclusiones.

Los datos podrán ser usados tanto para cuantificar la probabilidad de fallo de accidentes, como para conocer los equipos a los que suelen asociar-

se fallos, así como los desarrollos de accidentes más usuales, y de esta forma tomar medidas preventivas sobre las posibles causas iniciadoras, así como medidas mitigadoras de los efectos.

Descripción

Algunos factores que se deben considerar al plantear y desarrollar un análisis histórico de accidentes son:

1. Determinar la definición de accidentes a analizar

- Tipo de accidentes a ser estudiados (productos, instalaciones)

2. Identificación exacta del accidente

- Lugar
- Fecha y hora
- Productos implicados
- Instalación o equipos implicados

3. Identificación de las causas de accidentes

- Errores humanos
- Fallos de equipos
- Fallo de diseño o de proceso

4. Identificación del alcance de los daños causados

- Pérdida de vidas
- Heridos
- Daños al medio ambiente
- Pérdidas en instalaciones y daños materiales
- Evacuación de personas, otras medidas, etc.
- Impacto en la población en general

5. Descripción y valoración de las medidas aplicadas y, si es posible, de las estudiadas para evitar la repetición del accidente.

Principales bases de datos

Los resultados obtenidos dependen mucho de la calidad y de la información disponible en las fuentes de información consultadas.

Existen multitud de bases de datos que aportan información bien acerca de las frecuencias de fallos en equipos, bien en relación con los accidentes ocurridos en el mundo, indicando sus causas y consecuencias, así como en relación a sustancias peligrosas. Entre ellas, destacan las siguientes:

- Bases de datos de accidentes: FACTS (TNO), MARS (CEE), MHIDAS (UK), etc.
- Bases de datos sobre sustancias: UMPLIS (G), CHEMDATA (UK), RECDIN (CEE), R. D. 363/95, RTEC.

El empleo de bases de datos debe plantearse como una técnica de apoyo a otras técnicas, de forma que una vez conocido el historial de accidentes característico de un tipo de instalación, se puede fijar el alcance del estudio. En este sentido, es de gran utilidad contar con datos de accidentes obtenidos de la propia instalación, en aquellos casos en los que sea posible.

Procedimiento

El procedimiento a seguir sería el siguiente:

1. Obtener información y datos de las bases de datos: informes de los accidentes.
2. Discernir qué informes son asimilables a la instalación que esté siendo objeto de consideración: selección de informes aplicables.
3. Elaboración estadística. (suele ser corta: medias, frecuencias) que permitan los informes.
4. Estudio técnico de cada accidente (y de sus orígenes, frecuencias y consecuencias), para revisar los puntos críticos (de instalación y operación) que ponen de manifiesto.
5. Adopción de medidas técnicas que neutralicen los riesgos originados en dichos puntos críticos. ¿Se sabe qué medidas se adoptaron en los accidentes estudiados para evitar su repetición?

Puntos fuertes

Como puntos fuertes de esta técnica, presenta:

- está basado en casos reales
- es simple y barata, y
- va directa a causas importantes.

Puntos débiles

Como puntos débiles cabe destacarse:

- Los accidentes sobre los que se puede obtener una documentación completa son únicamente “los más importantes”.
- En los bancos de datos informatizados, con frecuencia los datos reflejados son insuficientes; las causas quedan a menudo sin identificar. En algunos casos, existen referencias que aportan documentación adicional pública microfiltrada.
- Los datos a menudo no son extrapolables a instalaciones de diseño diferente. Los accidentes producidos en el pasado han tenido en general respuestas como modificaciones o prácticas operativas más seguras que hacen que sea más difícil que se re produzcan en condiciones similares.
- Puede haber causas críticas que no se han manifestado en los accidentes estudiados o que no se han detectado.
- La cuantificación es mínima y dudosa. Predominantemente cualitativo.

Idoneidad

La idoneidad de esta técnica radica en que:

- Es una evaluación rápida, directa y económica de riesgos y causas más importantes en instalaciones existentes y en proyecto.
- Idóneo para identificar escenarios accidentales.

Recursos y tiempo necesarios

- Acceso a los bancos de datos
(ej, <http://mahbsrv.jrc.it/mars/Default.html>)

- Equipo profesional experto en diseño, instalación, operación normalmente, sin recurrir a expertos ajenos a la organización de la compañía que diseña y/o opera la instalación.

2.3.2 ANÁLISIS DEL RIESGO PRELIMINAR (PHA)

Descripción

Es un método de identificación de escenarios surgido en EE.UU., y aplicado fundamentalmente a programas de defensa, que trata de realizar una identificación previa de riesgos en la primera fase de diseño, evitando de este modo el costo que supondría rediseños o modificaciones planteadas en la etapa de operación.

La aplicación del análisis del riesgo preliminar (Preliminary Hazard Analysis, PHA) será de especial utilidad en aquellos casos en los que no se tenga información detallada sobre el historial de fallos, incidencias o problemas potenciales relativos a seguridad industrial en plantas de proceso, tal como puede suceder con plantas nuevas que empleen procesos industriales no aplicados hasta la fecha.

El PHA se centrará fundamentalmente en los materiales peligrosos existentes, así como en los principales elementos de la planta, dado que en las primeras etapas del diseño no se dispone de información suficiente sobre elementos concretos de la instalación.

El método comienza por la recopilación de información relativa a la planta en base a los siguientes aspectos:

- Información sobre materias primas, productos intermedios y finales, con datos acerca de su reactividad, toxicidad, etc.
- Equipos existentes.
- Factores del entorno con posible incidencia en la seguridad (temperatura ambiente, posibles movimientos sísmicos, etc.).
- Interfases entre los diversos componentes del sistema (iniciación y propagación de fuego y explosión, sistemas de control).
- Procedimientos de operación y de emergencia.
- Instalaciones.

- Equipos de seguridad.

Tras la recopilación de esta información, se realiza una identificación de los posibles riesgos, definiendo para cada uno de ellos las causas potenciales, los efectos, la posible gravedad de los accidentes y las probables medidas correctoras a tomar.

En lo relativo a la etapa de recopilación, se buscará toda la información disponible sobre plantas y procesos similares, en los que se empleen equipos y materiales del mismo tipo.

Los resultados, tal como se ha apuntado, se darán en forma de lista, en la que se incluya:

- Descripción del peligro.
- Causa.
- Principales efectos.
- Posibles acciones correctoras o preventivas.

Procedimiento

1. Obtener información y datos sobre materiales, operaciones previstas.
2. Discernir si se puede aprovechar la semejanza con otros procesos u operaciones experimentados anteriormente. Explorar y explotar tales semejanzas.
3. Exploración de las operaciones y equipos de los que cabe esperar criticidad: riesgos implicados (toxicidad, corrosividad, carga energética contenida y/o desarrollada, etc.).
4. Estudio técnico de los aspectos críticos que se hayan detectado en 3).
5. Adopción de medidas técnicas que disminuyan el riesgo previsto para los aspectos críticos. ¿Qué medidas se adoptaron, (probabilidad y severidad) en casos semejantes?

Puntos fuertes

- Simple y barato
- Directo a causas importantes.

Puntos débiles

- No es sistemático, puede no considerar algunas causas importantes pero poco aparentes.
- Depende mucho de los conocimientos y experiencia de los ejecutantes.
- Absolutamente cualitativo y desestructurado.

Idoneidad

Se usa para instalaciones y procesos en etapas de desarrollo y proyecto: cuando no hay otro remedio y hay urgencia.

Recursos y tiempo necesario

Ejecutantes que pueden suplir, con sus conocimientos y experiencia, la falta de información real y concreta (sobre riesgos y sus consecuencias) procedente de experiencias concretas anteriores.

Resultados

Se dan en forma de lista o tabla, en la que se incluye:

- Riesgo o identificación del peligro
- Causa
- Consecuencias
- Medidas o acciones correctivas

2.3.3 ANÁLISIS DEL WHAT IF?

Aplicación

El análisis What if?, es un método de identificación de riesgos muy empleado en la práctica habitual de las industrias químicas. Trata de llegar a determinar por medio de preguntas qué posibles consecuencias se darían ante un determinado fallo. Consiste, pues, en cuestionarse el resultado de la presencia de sucesos indeseados que pueden provocar consecuencias adversas.

Se aplica tanto a proyectos de instalación, como a plantas en operación, siendo muy común su aplicación ante cambios propuestos en instalaciones existentes.

El método tiene un amplio ámbito de aplicación, ya que depende del planteamiento de las preguntas, que pueden ser relativas a cualquiera de las áreas para las que se proponga la investigación, como pueden ser: seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, etc.

Sin embargo, la utilidad del método dependerá en gran medida del grado de conocimiento sobre los procesos desarrollados y la habilidad para encontrar los puntos críticos, de forma que si la experiencia del personal es escasa, el método generará unos resultados probablemente incompletos.

Descripción

Las preguntas comenzarán, por lo general, contemplando un suceso iniciador, a lo que seguirá un análisis de las consecuencias previsibles, que requerirá conocer el comportamiento del sistema. El resultado del trabajo será un listado de posibles escenarios, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción del riesgo. Comparte elementos con el HAZOP, si bien el análisis What if es menos sistemático y estructurado, por lo que su aplicación es más sencilla.

Las etapas fundamentales de un análisis "What if?" son las siguientes:

- a) Definición del alcance del estudio: Debe definirse la categoría de las consecuencias (para el público, para los trabajadores de la planta o económicas), pudiendo subdividirse éstas en otras menores. A continuación se definirá el alcance físico del estudio, incluyendo posibles interacciones entre diferentes partes de la planta.

- b) Recogida de la información necesaria: es necesario que toda la información requerida se encuentre disponible al inicio del trabajo para poder desarrollarlo sin interrupciones. Se prepararán las preguntas.
- c) Definición del equipo de trabajo: Para cada área específica se definirán equipos de dos o tres personas. Cada equipo debe poseer:
- Experiencia en las consecuencias a analizar.
 - Conocimientos de la planta o procesos.
 - Experiencia en técnicas de evaluación de riesgos.
- d) Desarrollo del cuestionario: La revisión empieza con una explicación básica del proceso, utilizando la información disponible de la planta, por parte del mejor conocedor del sistema.

Es conveniente que los equipos se intercambien cuestiones para asegurar el buen camino del proceso. Se irán formulando las preguntas desde el inicio del proceso y respondiendo a esas mismas, añadiendo nuevas cuestiones cuando hicieran falta. Se van identificando los peligros, las posibles consecuencias, y las soluciones.

Las cuestiones planteadas podrían ser, por ejemplo, del tipo:

- ¿Qué ocurriría si se introduce una sustancia equivocada en el reactor?
 - ¿Qué ocurriría si el operario cierra mal la válvula?
 - ¿Qué ocurriría si la tubería se obstruye?
 - ¿Qué ocurriría si la temperatura ambiental supera los 30 °C?
 - ¿Qué ocurriría si se produce fuego exterior involucrando al tanque?.
- e) Resultados: La presentación de los resultados es fundamental para garantizar una aplicación correcta de los mismos. Deberán ser revisados por el director de la planta pa-

ra garantizar que las conclusiones son transmitidas a cada uno de los responsables por las diferentes actuaciones.

Procedimiento

1. Se elige un enfoque o alcance para cada parte del estudio (seguridad del propio proceso, seguridad de las personas, seguridad eléctrica, DCI, etc.) o se decide llevar el estudio de manera global con la sola referencia a la secuencia del proceso.
2. Se explica el funcionamiento del proceso.
3. Empezando por el principio del proceso (normalmente almacenamiento y admisión de materias primas), avanzando a lo largo de las etapas del mismo (sobre el diagrama P&I, por ejemplo) hasta el final (salida y almacenamiento de productos, subproductos y residuos) se plantean y anotan todas las preguntas WF que se les ocurra a los participantes. No contestarlas durante esta etapa. Puede ser conveniente, después de lo anterior, revisar estudios *What if?* anteriores, si hay, para comprobar si hay preguntas *What if?* adicionales.
4. Contestación a las preguntas *What if?* Una por una. Por todo el equipo. Algunas requerirán estudio aparte o la participación de especialistas (control, materiales, mantenimiento, etc.).
5. Consideración, para cada pregunta *What if?*, de qué medidas existen y cuáles cabe tomar para prevenir el riesgo, anulándolo o disminuyéndolo, en su origen.
6. Efectuar todo lo anterior para cada una de las partes decididas en 1, o, si se ha hecho el estudio único sin partes, reagrupar preguntas, contestaciones y remedios según los enfoques que se consideraron allí.
7. Redactar informe recogiendo: a) Breve descripción y esquema del proceso; b) Preguntas *What if?*; c) Su análisis y contestación; d) Descripción razonada de las mejoras (alternativas o modificaciones) propuestas para neutralizar o reducir riesgos.
8. Comunicar el informe a los centros pertinentes de decisión (de la planta o del proyecto) para que se adopten las medidas oportunas.

Puntos Fuertes

- Creativo, espontáneo e intuitivo.
- Variado: considera riesgos de orígenes varios.
- Económico en tiempo y medios: se manifiestan y consideran de manera directa las consecuencias causas/consecuencia/remedio más importantes.
- Muy útil para entrenar personal técnico en la identificación de riesgos.
- Eficaz para análisis cualitativo inicial: proporciona pistas relativas a los asuntos que deben ser objeto de estudio mediante métodos más sofisticados.

Puntos Débiles

- Al ser desestructurado: tensión para dirigir y centrar el debate constantemente hacia los objetivos de cada etapa.
- Pueden pasar desapercibidos riesgos ocultos o procedentes de causas contaminantes.
- Depende mucho de la experiencia de los intervinientes y del conocimiento de su seguridad y operación, no sólo de su Unidad, sino de otras similares.
- Como método único de estudio sólo sirve para instalaciones y procesos muy sencillos.

Idoneidad

Muy útil en revamping y duplicación de Plantas ya existentes, ya que se dispone de personal con experiencia.

Recursos y tiempo necesario

- Grupo profesional poco numeroso (3 ó 4), pero con buenos conocimientos del proceso, del equipo y de las operaciones.

2.3.4 ANÁLISIS MEDIANTE LISTAS DE CHEQUEO

Aplicación

Las listas de chequeo de sistemas o procesos son una técnica de identificación aplicable para la evaluación de equipos, materiales o procedimientos y utilizable durante cualquiera de las etapas de desarrollo de un proyecto. Es una manera adecuada de evaluar el nivel mínimo aceptable de riesgo de un determinado proyecto; evaluación necesaria en cualquier trabajo independientemente de sus características.

Muchas organizaciones utilizan las listas de inspección estandarizadas para seguimiento y control de las diferentes fases de un proyecto.

Deben ser preparadas por personal que esté familiarizado con el funcionamiento general de la planta y los procedimientos estándares de la compañía. Debe haber una doble vertiente de comunicación entre miembros del proyecto y control del mismo. Una vez que está preparada, su aplicación puede corresponder a personal menos experimentado, siempre que cuente con la supervisión de algún experto.

Las listas de chequeo se ajustarán generalmente a unas normas mínimas, de forma que sean susceptibles de evaluaciones posteriores. Dichas evaluaciones serán realizadas por personal ajeno al que prepare las listas de chequeo y resultarán en actualizaciones, ampliaciones o modificaciones de las mismas.

Descripción

El método de las listas de chequeo, consiste en la elaboración de una lista de aspectos a comprobar en relación con la seguridad de una instalación industrial y elaborada en función de la etapa del proyecto: diseño, construcción, arranque, operación y parada.

Las listas de inspección deben ser preparadas por personas de gran experiencia. En este sentido hay que destacar que el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) ha desarrollado un método basado en listas de chequeo, inspirados en los diagramas causa-efecto de Ishikawa (espinas de Ishikawa).

Dicha metodología se utiliza igualmente para comprobar el cumplimiento de determinados reglamentos y normas, en sus aspectos técnicos y de seguridad más relevantes.

Es, por tanto, un método de estructura lineal con lista de cuestiones concretas, relativas a los aspectos de proceso y de riesgo, que cabe plantear para todas las etapas de un proyecto, de la operación de la planta, de las paradas, etc.

Las listas deben cubrir todos los elementos de equipo (aparatos, tuberías, válvulas, instrumentos, controles, alarmas, etc.). Es típico el empleo de este método en las auditorías de seguridad que se efectúan a procesos y plantas.

Las preguntas deben realizarse con objeto de que permitan una respuesta si/no.

Procedimiento

- Realizar las listas de chequeo.
- Realizar los controles de la lista sobre la instalación.
- Emitir informe.

Puntos Fuertes

1. Fácil, directo y controlado.
2. Bueno para adiestramiento de evaluadores de riesgos.
3. Proporcionan una demostrabilidad clara del cumplimiento de las regulaciones de referencia.
4. Constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instituciones técnicas.

Puntos Débiles

1. Calidad muy dependiente de la de las listas de comprobación empleadas; pueden pasarse por alto riesgos no incluidos.
2. El alcance está muy limitado a las regulaciones de referencia empleadas para preparar las listas.

Idoneidad

Dentro de sus características, comentadas antes, las listas de chequeo pueden servir para proyectos de plantas nuevas similares a las existentes o de modificaciones. También sirven como base para enjuiciar, mediante auditoría, el cumplimiento o no de regulaciones de instalaciones existentes. Los casos de no cumplimiento deben originar recomendaciones para modificar consecuentemente las instalaciones o el proceso.

Recursos y tiempo necesario

Si bien realizar las listas de chequeo es un trabajo riguroso y lento, realizar la comprobación es un método directo, rápido y barato.

2.3.5 ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLOS Y EFECTOS (FMEA)

El análisis de los modos de fallo y efectos (*Failure Modes and Effects Analysis*) tiene como objetivos los siguientes:

1. Establecer los fallos posibles en todos y cada uno de los elementos de equipo (de proceso y de control) en una planta.
2. Analizar las consecuencias de los fallos establecidos en el paso anterior para detectar aquellas que puedan ser origen de accidentes.
3. Establecer medidas de protección que eviten los fallos que sean significativos.

Descripción

En general, se parte de un listado de los equipos y componentes de la instalación susceptibles de provocar un fallo, y, para cada uno de ellos, deben identificarse sus modos de fallo.

Algunos ejemplos de las desviaciones que se consideran modos de fallo, se pueden ver en la Tabla 2.3.

**TABLA 2.3
DESVIACIONES COMO FALLOS FMEA**

Debe	Fallo
Estar cerrado	Estar abierto
Estar abierto	Estar cerrado
Flujo	No fluir
En marcha	Parado
Estando	Fuga
Señal de indicación o mando	Falta de señal
Accionamiento	Sin accionamiento
Refrigeración	Sin refrigeración
Abrir	No abrir
Cerrar	No cerrar
Sin fuga	Fuga
Etc.	No etc.

El desarrollo del FMEA se facilitará utilizando una tabla del tipo:

FECHA: _____		PAGINA _____ DE _____			
PLANTA: _____		REFERENCIA: _____			
SISTEMA: _____					
Item	Descripción	Modo de fallo	Detección	Efectos	Medidas Correctoras

Procedimiento

1. Dividir la instalación en secciones de estudio.
2. Identificar y listar todos los elementos de equipo (de proceso y de control) dentro de una sección del proceso en la planta.
3. Definir el funcionamiento de cada elemento de equipo.
4. Definir los fallos posibles.
5. Definir las consecuencias de los fallos definidos.
6. Establecer si los fallos definidos y las consecuencias definidas afectan a otros elementos de equipo aparte del que se esté considerando. En caso afirmativo debe trasladarse la parte del análisis correspondiente al elemento receptor de la influencia para determinar consecuencias sobre el mismo.
7. Discernir y recomendar medidas preventivas viables que eviten los fallos definidos, que sean significativos a efectos de seguridad.
8. Registro escrito (informe) del análisis.

Puntos Fuertes

1. Es económico: va directamente a los fallos importantes procedentes de la experiencia y del funcionamiento de los aparatos. Requiere pocos analistas (1-2).
2. Puede servir como base para detectar sistemas, elementos y fallos que deban ser objeto de análisis más profundos.
3. Documentación básica sencilla.
4. Pueden cuantificarse probabilidades de ocurrencia de los modos de fallo, haciendo que el análisis sea semicuantitativo, como veremos más adelante.

Puntos Débiles

1. No es sistemático: pueden pasarse por alto fallos y consecuencias.

2. No considera combinaciones de fallos coincidentes o en secuencia.

Idoneidad

1. Aplicable a distintas etapas de proyecto y a la operación de plantas existentes.
2. Muy aplicable para el análisis de sistemas de control de procesos.

Recursos y tiempo necesario

El equipo deben formarlo de 1 a 3 personas, y es un proceso más lento que los analizados anteriormente.

2.3.6 ANÁLISIS DE RIESGO Y OPERATIVIDAD (HAZOP)**Aplicación**

Los análisis del riesgo y operatividad (HAZard and OPerability Studies, HAZOP) constituyen una de las técnicas más estructuradas para identificar los peligros asociados a una planta de proceso. Tratan de identificar las posibles desviaciones frente a las condiciones de diseño que pueden darse en una planta química.

A pesar de que surgió como técnica de identificación de riesgos para procesos desconocidos, en los que el diseño o la tecnología empleada era nueva, su uso se ha extendido a la mayoría de las fases de desarrollo de una instalación.

El método encuentra su aplicación principalmente en instalaciones de proceso de relativa complejidad o en áreas de almacenamiento con equipos de regulación o diversidad de tipos de trasiegos.

Es particularmente provechoso su uso en plantas nuevas. Su aplicación principal se encuentra en la identificación de riesgo en las primeras etapas del diseño, al ser el mejor momento para introducir cambios o modificaciones, dado que los resultados son recomendaciones de mejora que modificarán el diseño final de los equipos o sistemas.

El claro desarrollo de su metodología y su versatilidad a la hora de aplicarse a cualquier tipo de instalación industrial, fundamentalmente en el campo

de la industria química y petroquímica, he hecho que en los últimos tiempos sea, sin duda, la técnica de análisis de riesgos en procesos más utilizada.

Descripción

Se trata de un método deductivo para la identificación de riesgos en instalaciones de proceso, mediante un estudio riguroso, sistemático y crítico de la planta y proceso diseñado, al estimar el potencial de peligrosidad que puede derivarse del mal funcionamiento de la instalación o por errores de operación, estimando los efectos que pueden resultar para el conjunto de la instalación.

Consiste en un trabajo desarrollado por un equipo multidisciplinar, en el que deberán participar técnicos familiarizados en control, operación, instrumentación, así como en la técnica HAZOP. El equipo se centrará en los principales elementos de la instalación, o nodos, en los que se revisarán las desviaciones en los parámetros del proceso, por medio de unas determinadas palabras-guía, con el significado mostrado en la Tabla 2.4.

Procedimiento

El procedimiento consiste en un estudio sistemático y estructurado llevado a cabo por un equipo multidisciplinar de profesionales liderados por un Coordinador, de una instalación equipo por equipo y línea por línea, es decir, puntos específicos del proceso o NODOS, donde se van a evaluar las correspondientes desviaciones.

TABLA 2.4
SIGNIFICADO DE LAS PALABRAS GUÍA

PALABRAS GUÍA	SIGNIFICADO
NO	NEGACIÓN O AUSENCIA DE LAS ESPECIFICACIONES DE DISEÑO
MÁS MENOS	AUMENTO O DISMINUCIÓN CUANTITATIVA Se refiere a variables de proceso como caudal, presión, temperatura, o a actividades (calentar, reaccionar, etc).
MÁS DE o ASÍ COMO	AUMENTO CUALITATIVO Si bien se realiza la función deseada, junto a ella tiene lugar una actividad adicional.
PARTE DE	DISMINUCIÓN CUALITATIVA Se realiza solamente una parte de la función deseada.
INVERSO	OPOSICIÓN A LA FUNCIÓN DESEADA Utilizable preferentemente para actividades (flujo de retroceso, inversión de reacción química, etc.).
DE OTRA FORMA	SUSTITUCIÓN COMPLETA DE LA FUNCIÓN DESEADA.

De la combinación de cada una de las palabras-guía con cada una de las variables de proceso a analizar, entre los que pueden encontrarse flujo, presión, temperatura, nivel, concentración, ratio de reacción, viscosidad, pH, agitación, fase o tiempo de residencia, surgen desviaciones frente al comportamiento normal que el método pretende evidenciar, encontrando de esta forma, las causas que las pueden originar, así como las consecuencias.

Como en la mayoría de las técnicas anteriores, la información disponible sobre la planta, el proceso y las condiciones de operación resultará fundamental.

Una vez que se disponga de suficiente información, (en principio, para plantas existentes, bastará con el asesoramiento suministrado por el Jefe de Operación y los diagramas P&I), el líder del grupo identificará los nodos de estudio, comenzando por la alimentación a la planta, hasta llegar a completar el proceso.

Las fases a seguir son:

1. Definición del área de estudio

La primera fase del estudio *HAZOP* consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En la instalación de proceso objeto de estudio, se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o unidades que corresponden a entidades funcionales propias, como por ejemplo: preparación de materias primas, reacción, separación de disolvente, etc.

2. Definición de los nodos

En cada subsistema se identificarán una serie de nodos o puntos claramente localizados en el proceso. Ejemplos de nodos pueden ser: tubería de alimentación de una materia prima a un reactor, aguas arriba de una válvula reductora, impulsión de una bomba, etc. Cada nodo será numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido de proceso para mayor comodidad. La técnica *HAZOP* se aplicará a cada uno de estos puntos. Cada uno de ellos vendrá caracterizado por unos valores determinados de las variables de proceso: temperatura, caudal, composición, viscosidad, etc.

Como criterio para seleccionar los nodos: básicamente se tomarán en consideración los puntos del proceso en los cuales se produzca una variación significativa de alguna de las variables de proceso.

Por su amplio uso la técnica tiene variantes, como puede ser sustituir el concepto de nodo por el de tramo de tubería, o por la identificación nodo-equipo.

3. Definición de las desviaciones a estudiar

Para cada nodo se plantean de forma sistemática las desviaciones de las variables de proceso, aplicando a cada variable una palabra-guía de las descritas anteriormente.

El *HAZOP* puede consistir en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabra-guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión las desviaciones que no tengan sentido para un nodo determinado. Se puede fijar a priori, en una fase previa, una lista de desviaciones esenciales a estu-

diar en cada nodo, resultando menos laborioso, aunque menos exhaustivo, el HAZOP en este último caso.

4. Sesiones HAZOP

Tienen como objetivo inmediato analizar las desviaciones planteadas de forma ordenada y siguiendo un formato de recogida de resultados.

El documento principal utilizado en estas sesiones son los diagramas de tuberías e instrumentación, aunque pueden ser necesarias consultas a otros instrumentos como: diagramas de flujo, manuales de operación, especificaciones técnicas, etc.

5. Informe final

El informe final de un HAZOP constará de los siguientes documentos

- Esquemas simplificados con la situación y numeración de los nodos de cada subsistema.
- Formatos de recogidas de las sesiones con indicación de las fechas de realización y composición del equipo de trabajo.
- Análisis de los resultados obtenidos. Se puede llevar a cabo una clasificación cualitativa de las consecuencias identificadas.
- Lista de las medidas a tomar obtenidas. En realidad es una lista preliminar, a estudiar en profundidad en función de otros criterios (impacto en el resto de la instalación, mejor solución técnica, coste) cuando se disponga de más elementos de decisión (como frecuencia del suceso y consecuencias).
- Lista de los sucesos iniciadores identificados.

Otras ventajas adicionales del método:

- Ocasión perfecta y quizás única para contrastar distintos puntos de vista de una planta.

- Es una técnica sistemática que puede crear desde el punto de vista de seguridad hábitos metodológicos útiles.
- El coordinador del equipo mejora su conocimiento del proceso.
- No requiere prácticamente recursos, a exclusión del tiempo de dedicación.

Como inconvenientes se pueden citar:

- Es una técnica cualitativa. No hay una valoración real de la frecuencia de las causas que producen una consecuencia grave, ni tampoco el alcance de la misma.
- Las modificaciones de la planta surgidas el HAZOP deben analizarse con mayor detalles y con otros criterios.
- Los resultados obtenidos son muy dependientes de la calidad del equipo.
- Es muy dependiente de la información disponible. Puede omitirse un riesgo si los datos de partida son erróneos o incompletos.

2.3.7 ANÁLISIS DEL ÁRBOL DE FALLOS

Aplicación

El análisis del árbol de fallos (Fault Tree Analysis, FTA), es una herramienta muy utilizada en los análisis sobre la seguridad de sistemas o elementos en plantas químicas. Una de las principales ventajas del método es su sistematización, que permite determinar los diversos factores que contribuyen a los accidentes, si bien requiere un cierto grado de conocimiento tanto de la planta y del proceso, como del método en sí.

El uso de programas informáticos permite simplificar de manera considerable las tareas a realizar.

Descripción

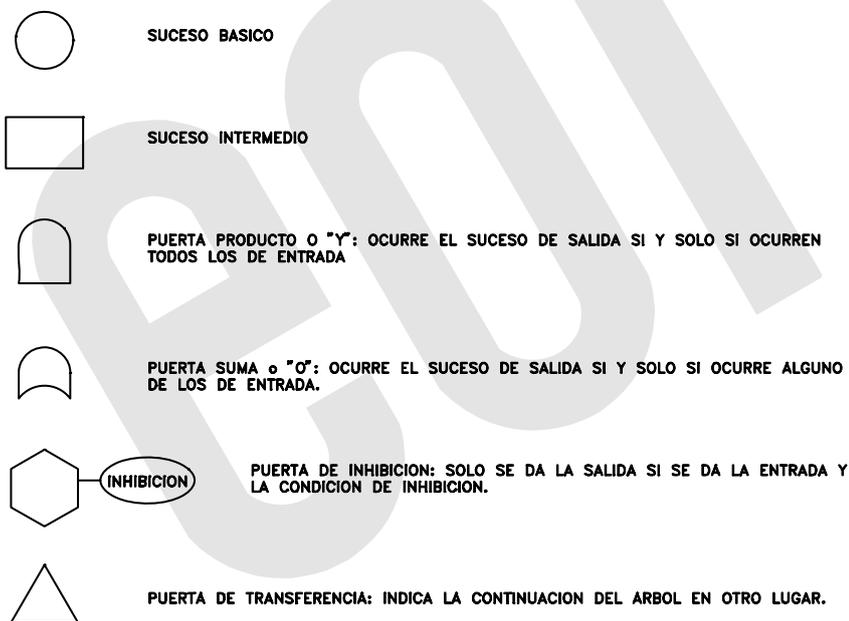
El método del FT comienza con la identificación de un accidente dado. A partir de éste (suceso final o top event), se llegan a determinar los sucesos básicos o iniciadores, así como las diferentes formas secuenciales que permiten, a través de las diferentes posibilidades, que el acontecimiento final tenga lugar.

La interrelación entre los diferentes sucesos y sus causas se establece de forma gráfica mediante una simbología basada en árboles lógicos, que facilite su análisis. El método permite determinar la probabilidad de que el acontecimiento final suceda, en función de la probabilidad de ocurrencia de los sucesos básicos identificados.

El cálculo de la probabilidad del suceso final se valdrá del álgebra de Boole cuando el sistema tenga un cierto grado de complejidad, dado que la interrelación entre sucesos se realiza por medio de puertas lógicas, con la simbología indicada en la Figura 2.2 adjunta.

FIGURA 2.2

SIMBOLOGÍA DE PUERTAS LÓGICAS



Como principales utilidades del método destacan:

- La identificación de las combinaciones de fallos de equipos y errores humanos que pueden llegar a un accidente.
- La cuantificación de la probabilidad del suceso final (de difícil determinación, por la interrelación entre causas de fallo) en función

de la probabilidad de fallo de cada una de las causas básicas (usualmente recogida en bibliografía especializada).

- La identificación de las causas que contribuyen de manera preferente al suceso final, con objeto de optimizar la introducción de medidas correctoras.

Procedimiento

1. Listar los sucesos finales (SF): son los más complejos, por eso se analizan, pero los más fáciles de intuir y de obtener de la experiencia o de un banco de datos. Ejemplos: explosión de un recipiente a presión (depósito, reactor, etc.), explosión e incendio en un horno, fallo de un gran compresor, etc. Conviene listarlos todos ante de pasar a sucesos intermedios y básicos. Cada SF será la cabecera de un árbol de fallos independiente. Posteriormente cabe la posibilidad de agrupar los árboles de fallos tomando como nuevos SF los accidentes fundamentales (emisión, incendio, explosión, etc.) para componer la probabilidad (cuando se haga análisis cuantitativo según veremos) de cada uno de dichos accidentes fundamentales.

2. Establecer y listar los sucesos intermedios (SI) y básicos (SB) mediante el camino inductivo y las preguntas:

- ¿Por qué ocurre el SF?: sucesos intermedios y básicos; relaciones efecto-causa.
- ¿Son alternativos?: puertas OR.
- ¿Son concurrentes?: puertas AND.

Conviene actuar en pasos cortos para no saltar sucesos intermedios y puertas, lo que afectaría negativamente a la calidad del árbol y de su análisis.

3. Dibujar el árbol de fallos. Utilizando los símbolos de la Figura 2.2

4. Se determinan los conjuntos mínimos de fallos (CMF): es normal hacerlo mediante el álgebra de Boole o mediante el método matricial y el empleo de ordenadores.

5. Análisis del árbol de fallos. Establecidos los CMF cabe continuar el análisis cualitativo mediante varios criterios:

Puntos Fuertes

1. Permite y prepara un análisis cuantitativo detallado ulterior.
2. La preparación y análisis de árboles de fallos hace que los analistas obtengan un conocimiento muy profundo del proceso, así como de sus puntos fuertes y débiles en lo relativo a la Seguridad.
3. Genera recomendaciones de mejora muy concretas (y de alcance medio si se hace el análisis cuantitativo). Facilita el establecimiento de prioridades para proponer y ejecutar mejoras. Permite comparar alternativas.
4. Muy útil para el análisis complejo de un accidente posible, detectado normalmente a través de otra técnica de Evaluación e identificación de Riesgos.

Puntos Débiles

1. Requiere mucho tiempo: esto puede aliviarse mediante el empleo de programas de ordenador.
2. Pueden no detectarse fallos (SC o SB) que quedarían sin considerar.
3. Pueden darse errores en la lógica del árbol: no considerar fallos intermedios, relaciones-causa-efecto y/o puertas incorrectas, etc.
4. Siendo una técnica binaria (considera posibilidades si/no) no tiene en cuenta la velocidad a que puedan producirse los acontecimientos. Tal velocidad puede determinar que un evento sea peligroso o no.

Idoneidad

Al ser un sistema tan complejo y que analiza con tanto rigor el fallo, es especialmente útil para el análisis detallado de accidentes posibles.

Recursos y tiempo necesario

- Necesidad del paquete completo de ingeniería básica y de detalle del sistema.

- Equipo analista multidisciplinar, incluido un especialista en la metodología de análisis.
- Se hace de importancia capital el uso de herramientas informáticas.
- El tiempo dedicado por Suceso Final es importante, de forma que analizar todos los posibles accidentes mediante esta técnica sería muy costoso en tiempo y medios.

2.3.8 ANÁLISIS DEL ÁRBOL DE SUCESOS

Aplicación

Los árboles de suceso (Event Tree, ET) evalúan las posibles consecuencias asociadas al fallo en un equipo o alteración en el proceso. Así como los árboles de fallo utilizaban la retrospectión (a partir del accidente final, se investigan las posibles causas), los árboles de suceso utilizan un análisis que va hacia adelante (a partir de un suceso iniciador, determinan sus posibles consecuencias).

Son de gran utilidad a la hora de identificar las posibles consecuencias que resultan tras un fallo. Asimismo, su utilización permitirá conocer qué accidentes localizados, mayores o catastróficos, se podrán generar a partir de un único suceso iniciador, lo que enriquecerá la profundidad de la identificación de escenarios.

Descripción

El proceso comienza por identificar el suceso iniciador. A continuación, y de forma gráfica, se establece la secuencia accidental en función de los diferentes caminos de accidente seleccionados. Para cada una de los posibles sucesos subsecuentes ó medidas correctoras, se establecen dos caminos, en función de que se produzcan o no el desarrollo accidental considerado o ac-túe o no la medida correctora.

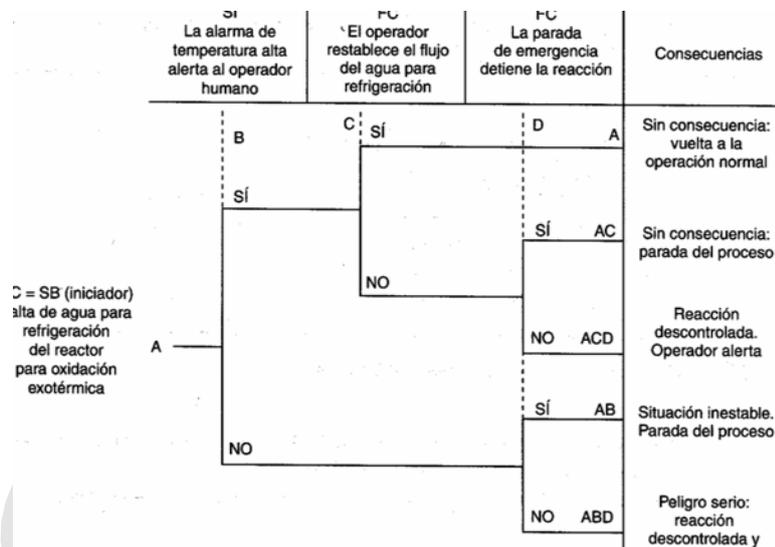
Además de recoger de forma gráfica y directa los posibles desarrollos de accidente ocasionados por un único suceso iniciador, permite la posibilidad de establecer cuál de ellos es el que cuenta con una mayor probabilidad de ocurrencia, si se cuantifica la probabilidad de cada uno de los sucesos intermedios.

Procedimientos

1. Identificación de los sucesos básicos iniciadores (SB). Estudiando con detalle los elementos del equipo (de proceso y de control) se contesta a las preguntas ¿Qué puede fallar de este elemento y de cada una de sus partes? (Ejemplos: en un compresor: válvula de seguridad, lubricación, sellos, accionamiento, rotete, etc.). Cada suceso básico iniciador relevante será la cabeza o suceso capital de un árbol de sucesos separado.
2. Aplicación de la disyuntiva (si/no o fracaso/éxito) al suceso básico capital del árbol.
3. Deducción del suceso intermedio, sobre cada una de las alternativas de la disyuntiva, cuando haya lugar (ejemplos: ignición, rotura de eje, etcétera).
4. Aplicación del factor condicionante (FC) que puede influir sobre cada alternativa de las disyuntivas establecidas en 2 (ejemplos: alarma, intervención humana o automática derivada de aquélla, alivio mediante dispositivo de seguridad, parada de emergencia, etc.).
5. Aplicación de la disyuntiva (si/no o fracaso/éxito) a cada suceso intermedio y/o factor condicionante dispuesto en secuencia lógica de ocurrencia. [Ejemplo: ignición (si/no)-detección (si/no)-alarma (si/no)-actuación DCI (si/no)-extinción (si/no).]
6. Representación gráfica de: suceso básico (SB), sucesos intermedios (SI), factores condicionantes (FC) formando el árbol de sucesos.
7. Exploración crítica de todas las disyuntivas definidas para ver si hay más SI y más FC que deban tenerse en cuenta en el análisis. Si aparecen: aplicar 3, 4, 5 y 6 como sea oportuno. Si no aparecen: las disyuntivas últimas determinan las consecuencias finales del análisis.
8. Establecimiento y análisis de las consecuencias. Una consecuencia puede ser: «sin consecuencia».
9. Determinación y registro escrito de las recomendaciones derivadas del análisis. Las mejoras se traducirán en nuevos FC, o en la eliminación de FC anteriores, con los que conviene repetir el

análisis para observar la sensibilidad (resultado, sobre las consecuencias) del árbol a las medidas recomendadas.

FIGURA 2.3 ÁRBOL DE SUCESOS



Puntos Fuertes

1. Permite y prepara un análisis cuantitativo ulterior.
2. Los analistas ganan conocimiento detallado del equipo y del proceso.
3. Genera recomendaciones de mejora muy concretas (y de alcance medido si se hace el análisis cuantitativo).
4. El árbol es más sencillo de establecer y analizar que los de fallos.
5. Muy útil para determinar las diferentes hipótesis de consecuencias a las que puede dar lugar un accidente determinado. Ver los árboles de sucesos en el Capítulo II.

Puntos Débiles

1. Requiere mucho tiempo: esto puede aliviarse mediante el empleo de programas de ordenador (sobre todo cuando el análisis sea cuantitativo).
2. Puede no detectar fallos (SB, SI, FC) que quedarían sin considerarse.
3. Puede haber errores en la lógica del árbol.

Idoneidad

Sistemas complejos de procesos incluyendo muchos aparatos, instrumentos, equipo para control y alarma, operadores humanos, etc.

Recursos y tiempo necesarios

Al igual que para el caso de los Análisis mediante Árboles de fallos, tanto los medios materiales como humanos necesarios son abundantes, lo que hace que sean técnicas aplicadas a sucesos concretos.

2.3.9 ANÁLISIS DE CAUSA-CONSECUENCIA**Aplicación**

Es una técnica que combina las características de los árboles de fallo con los de consecuencias. La ventaja para el analista es la posibilidad de utilizar un método gráfico que permita proceder hacia adelante (las consecuencias de un suceso) y hacia atrás (las causas básicas del mismo). Como resultado, por tanto, relaciona las consecuencias de un accidente específico con sus muchas causas posibles.

En los diagramas causa-consecuencia, se analizan tanto sucesos iniciadores como finales, resultando en una secuencia de accidentes que los relacionan. Los grupos seleccionados representan las combinaciones de causas básicas que pueden resultar en la secuencia del accidente, análogamente a los árboles de fallos.

Procedimiento

1. Elección de un suceso capital para ser evaluado: puede ser complejo, como en el árbol de fallos, o iniciador, como en el árbol de sucesos.

2. Identificación de factores condicionantes y sucesos intermedios: incluye los elementos de seguridad.
3. Establecimiento de las consecuencias de acontecimiento entre los elementos definidos en 1 y 2, incluyendo sus salidas disyuntivas o no (hay sucesos intermedios que tienen una salida única).
4. Aplicación del árbol de fallos a las salidas de las disyuntivas que los supongan (por ejemplo: fallo de los elementos de seguridad, salidas únicas en fallo, etcétera).
5. Determinación de los conjuntos mínimos de fallo (CMF) tal y como se hace en los árboles de fallos.
6. Evaluación y registro escrito de resultados.
7. Elaboración de recomendaciones.

A pesar de compartir las técnicas de árboles de fallo y suceso, y por tanto, permitir la cuantificación de las probabilidades de los accidentes finales, está en desuso, debido a la complicación que presenta frente a los otros métodos de árboles.

2.3.10. ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO

Aplicación

Existen diversas técnicas cualitativas empleadas para la detección de posibles fallos humanos basados en el análisis de las tareas que realiza el hombre. Se desarrollaron, fundamentalmente con la industria militar y estaban encaminadas a identificar tanto los posibles errores, como a cuantificar su incidencia en accidentes.

A pesar de que son técnicas que pueden ser empleadas de forma independiente, lo normal será su utilización en conjunción con otras técnicas de identificación de escenarios. En particular, suele apoyar a otras técnicas en lo referente a la cuantificación de las probabilidades de fallo originadas por error humano, así como al estudio de comportamiento humano ante un determinado suceso de accidente.

Descripción

Uno de los métodos de sistematización del error humano más simples y conocidos es el denominado método Teseo, que estima la probabilidad del error humano como producto de los factores K1 a K5, recogidos en la Tabla 2.5. Recoge tanto condiciones físicas como ambientales mediante el análisis de tareas. A través de esta técnica, se identifican situaciones error-probabilidad que puedan causar un accidente.

Así, por ejemplo, ante la ocurrencia de un determinado accidente se puede asumir una probabilidad de error humano de 0,3 resultado de las siguientes consideraciones:

- El operador está sujeto a una actividad no rutinaria: $K1 = 0,1$.
- Se requiere su actuación en un corto espacio de tiempo: $K2 = 1$.
- Su adiestramiento puede considerarse medio: $K3 = 1$.
- Se trata de una situación de grave emergencia: $K4 = 3$.
- Dispone de un buen microclima con una buena interfase con la planta: $K5 = 1$.

TABLA 2.5
PARÁMETROS DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO

TIPO DE ACTIVIDAD	K1
Rutinaria, simple	0,001
Rutinaria, requiere atención	0,01
No rutinaria	0,1
FACTOR DE ESTRES TEMPORAL (tareas rutinarias)	K2
Tiempo disponible: 2 segundos	10
Tiempo disponible: 10 segundos	1
Tiempo disponible: 20 segundos	0,5
FACTOR DE ESTRES TEMPORAL (tareas no rutinarias)	K2
Tiempo disponible: 3 segundos	10
Tiempo disponible: 30 segundos	1
Tiempo disponible: 45 segundos	0,3
Tiempo disponible: 60 segundos	0,1
CARACTERÍSTICAS DEL OPERADOR	K3
Bien seleccionado y adiestrado, experto	0,5
Conocimiento y adiestramiento promedios	1
Escaso conocimiento, adiestramiento deficiente	3
FACTOR DE ANSIEDAD EN LA ACTIVIDAD REALIZADA	K4
Situación de grave emergencia	3
Situación de emergencia potencial	2
Situación normal	1
FACTOR ERGONOMICO EN LA ACTIVIDAD REALIZADA	K5
Microclima excelente, muy buena interfase con la planta	0,7
Buen microclima, buena interfase con la planta	1
Microclima aceptable, interfase con la planta aceptable	3
Microclima aceptable, interfase con la planta deficiente	7
Microclima en malas condiciones, interfase con la planta deficiente	10

2.4. MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS

Se trata de técnicas de análisis críticos que emplean índices globales del potencial de riesgo estimados a partir de las estadísticas. Estas pueden ser de disposición general o procedentes de la experiencia de las compañías en el diseño y la operación de plantas semejantes a las que se trata de enjuiciar.

En algún caso (método FMECA) se mezclan la estimación completamente cuantitativa de la probabilidad con la semicuantitativa (índices globales) de la severidad.

Estos métodos suelen conducir a conclusiones comparativas:

- Entre distintas plantas existentes.
- Entre situaciones, en una misma planta, antes y después de modificaciones o ampliaciones.
- Entre procesos diferentes dirigidos a un mismo fin.
- Entre alternativas de diseño dentro de un mismo proceso.
- Entre cualesquiera de los anteriores y unos valores, también procedentes de la experiencia, que se consideran aceptables.

2.4.1 ANÁLISIS DE RIESGO CON EVALUACIÓN DEL RIESGO INTRÍNSECO

El objetivo fundamental de esta técnica es facilitar una auditoría sistemática y semicuantitativa de instalaciones químicas existentes, solicitando si fuese preciso análisis parciales más profundos de algunas secciones o determinar que secciones pueden ser objeto de mejoras.

Descripción

Existen varios métodos de esta naturaleza. Participan del análisis preliminar de riesgos y de los análisis mediante listas de chequeo. Además incorporan coeficientes para la elaboración semicuantitativa de un índice de riesgo intrínseco que permite hacer comparaciones relativas entre diferentes plantas o entre diferentes unidades de una planta. Hay un método, originado por Gretener, que se emplea para evaluar el riesgo de incendio en edificios, sin embargo, tiene más interés para nosotros el que ha presentado en Espa-

ña el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo a través de la publicación “Índices de procesos químicos: guía de autoevaluación”.

Dicha guía incluye un cuestionario para información o comprobación de numerosos aspectos relacionados con la seguridad de las instalaciones, como: Peligrosidad de las sustancias químicas, peligrosidad del proceso, y otros muchos.

El cuestionario, para cada aspecto de la planta a analizar, como por ejemplo: “Condiciones materiales de seguridad. Bombas” dispone de una lista de chequeo a cumplimentar.

Posteriormente, se realiza una valoración semicuantitativa en base a una puntuación o índice individual de riesgo, y combinando todos ellos tal y como indica la guía se llega a obtener los índices globales de riesgo (IGR) para cada capítulo analizado.

Procedimiento

1. Cumplimentar los cuestionarios para evaluación (Anexo I de la Guía): marcar cuadrados.
2. Asignación de los índices individuales (IIR) dados (Anexo II) para los cuadrados marcados.
3. Evaluación de los índices globales (IGR), utilizando las ecuaciones dadas (Anexo II) para cada capítulo.
4. Enjuiciamiento por capítulos según criterio establecido.
5. Revisión de los capítulos con IGR altos para detectar las contribuciones más significativas.
6. Definición de mejoras.

Puntos Fuertes

1. Simple, barato y controlado.
2. Directo a causas importantes.
3. Buen adiestramiento de responsables de seguridad e higiene en las plantas.

4. Proporcionan demostrabilidad del cumplimiento de las regulaciones de referencia.

Puntos Débiles

1. No entra en las entrañas de los procesos.
2. Alcance limitado a lo incluido en las comprobaciones.

Idoneidad

Principalmente para el enjuiciamiento, auditoría y mejora en plantas existentes.

2.4.2 ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO, EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)

Los análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (Failure Mode, Effects and Criticity Analysis) se hará en los mismos principios que el Análisis ya visto FMEA, desarrollándose de forma similar.

La diferencia fundamental entre ambos métodos es el tratamiento semicuantitativo que se realiza en el FMECA, ya que a cada modo de fallo se le asigna un nivel de criticidad.

Los niveles de criticidad se pueden establecer mediante criterios subjetivos del equipo de trabajo, como el establecido en la Tabla 2.6.

**TABLA 2.6
NIVELES DE CRITICIDAD SUBJETIVOS**

EFECTO	NIVEL DE CRITICIDAD
- Ninguno	1
- Leves perturbaciones	2
- Importantes perturbaciones	3
- Peligro inminente	4

Otra posibilidad es establecer el Índice de Criticidad en base a la severidad y la probabilidad de ocurrencia del fallo, mediante la aplicación de una matriz como la siguiente:

ÍNDICE DE CRITICIDAD

		Severidad				
		1	2	3	4	5
Probabilidad	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	7	8
	3	3	6	7	8	9
	4	4	7	8	9	10
	5	5	8	9	10	10

Donde:

Severidad:

1. Catastrófica (accidente grave).
2. Alta (daño nuevo).
3. Media (daño moderado).
2. Bajo (daño ligero).
1. Sin daño.

Probabilidad:

1. Alta.
2. Moderada.
3. Media.
4. Baja.
5. Muy baja.

Evidentemente, la aplicación de estos modos de evaluación del Índice de Criticidad pueden combinarse con datos probabilísticos de fallos de dichos componentes, de acuerdo con la bibliografía y los datos existentes, así como el daño causado, expresado este, por ejemplo, en pérdidas monetarias.

Los puntos fuertes, débiles y la idoneidad del FMECA es similar a la de los FMEA.

2.4.3 ÍNDICES DE RIESGO

Dentro de las técnicas de identificación de riesgos, resultan de gran importancia aquéllas basadas en los denominados índices de riesgo. Éstos,, mediante la utilización de unos determinados coeficientes, dependientes de las características de peligrosidad de las sustancias involucradas, las condiciones de operación y las medidas de seguridad instaladas, determinan qué equipos o unidades presentan unos mayores niveles de riesgo.

Se trata de métodos semicuantitativos de identificación de riesgos, ya que, no llegando al rigor y detalle de una evaluación cuantitativa del riesgo, suponen un avance hacia ello de los métodos cualitativos, en el sentido de que son métodos que dan como resultado una clasificación relativa del riesgo asociado a una instalación o parte de la misma.

Las técnicas más representativas se corresponden con las siguientes:

- Índice DOW de fuego y explosión.
- Índice MOND.
- Método del grado de peligrosidad, o método FINE.
- Método de subselección.

El propósito es establecer un ranking relativo del riesgo sobre los equipos de una instalación industrial, con objeto de centrar en ellos las medidas de protección.

Su utilización en el diseño, llevará a identificar las zonas más vulnerables; en operación dan información sobre qué equipos dan lugar a mayores niveles de riesgo.

Dado que los dos primeros se encuentran en desuso, se expondrán el método FINE y el Método de Subselección.

A. Método del grado de peligrosidad (o método FINE)

Aplicación

Es un método que trata de identificar aquellos equipos a los que se debe dedicar mayor atención en la prevención de riesgos, mediante la asignación de un índice de peligrosidad a cada riesgo, determinando el costo aproximado de las medidas a implantar.

Ha cobrado especial preponderancia en el ámbito de los riesgos laborales, con objeto de jerarquizar los riesgos y las medidas correctoras aplicables.

Descripción

Según el método FINE original, la gravedad del peligro debido a un riesgo reconocido, se calcula por medio de la fórmula del grado de peligrosidad. Su evaluación numérica se obtiene de considerar tres factores:

- Consecuencias de un posible accidente (C):
Se define en función de las consecuencias del accidente.
- Exposición a la causa originadora (E).
Se trata de la periodicidad con la que se presenta el suceso iniciador que da lugar al accidente.
- Probabilidad de que ocurra la secuencia completa del accidente con sus consecuencias (P).
Se define como la probabilidad de que, una vez presentada la situación de riesgo, los acontecimientos de la secuencia completa del accidente se sucedan en el tiempo.

Con dichos valores se calcula el grado de peligrosidad, GP de la siguiente forma:

$$GP = C \times E \times P$$

En la Tabla 2.7 se listan los factores anteriores, con la asignación de valores en función de la magnitud del factor considerado.

TABLA 2.7
VALORES DE C, E Y P SEGÚN SUS MAGNITUDES

MAGNITUD DEL FACTOR	VALOR
Consecuencias	
- Catástrofe: numerosas muertes, daños mayores de 100 Mptas, etc.	100
- Varias muertes, daños de 50 a 100 Mptas.	50
- Pocas muertes, daños de 10 a 50 Mptas	25
- Lesiones graves, daños entre 0,1 y 10 Mptas	15
- Lesiones leves, daños hasta 0,1 Mptas	5
- Lesiones leves	1
Exposición	
- Continuamente	10
- Frecuentemente (\approx 1 vez al día)	6
- Ocasionalmente (1 vez/semana o mes)	3
- Irregularmente (1 vez/mes o año)	2
- Raramente (alguna vez)	1
- Remotamente	0,5
Probabilidad	
-Alta probabilidad	10
-Resultado posible. Probabilidad \approx 50%	6
-Resultado raro	3
-Resultado remoto	1
-Muy poco probable, pero posible	0,5
-Nunca ha sucedido. Muy remoto	0,1

Al realizar la aplicación del método a múltiples unidades, se ordenará todo por orden decreciente de grados de peligrosidad, estableciéndose una clasificación por riesgos entre equipos, lo que contribuirá a establecer prioridades de actuación.

Al margen de este ranking de peligrosidad, el método permite evaluar la eficacia de las medidas correctoras, al afectar de distinta forma a las consecuencias, el grado de exposición o la probabilidad.

Por último, el empleo del factor coste, FC y del grado de corrección, GC, permitirán analizar la rentabilidad de las medidas correctoras propuestas. Para ello, se evalúan ambos factores como se describe en la Tabla 2.8:

TABLA 2.8
VALOR DE FC Y GC SEGÚN SUS MAGNITUDES

MAGNITUD DEL FACTOR	VALOR
Coste	
- Más de 5 M ptas	10
- De 2,5 a 5 M ptas	6
- De 1 a 2,5 M ptas	4
- De 0,1 a 1 M ptas	3
- De 0,01 a 0,1 M ptas	2
- Inferior a 0,01 M ptas	1
Grado de corrección	
- Riesgo eliminado en un 100%	1
- Riesgo eliminado al menos 75%	2
- Riesgo eliminado del 50% al 75%	3
- Riesgo eliminado del 25% al 50%	4
- Ligero efecto sobre el riesgo	6

Una vez conocidos GP, FC y GC, se calcula el grado de justificación, J como:

$$J = \frac{C \times E \times P}{FC \times GC}$$

Por convenio, se estima que si es superior a 10, el gasto de la medida correctora se considera justificado.

De esta forma, se tendrá un método de decisión sobre las medidas a adoptar ante una situación de riesgo no aceptable.

La aplicación de este método, requiere del buen juicio del que lo aplica, así como un cierto grado de conocimiento de las instalaciones, procesos y medios de seguridad existentes. Además, el criterio al aplicarlo debe ser único y constante para todos los equipos, con objeto de que los resultados sean homogéneos y por tanto, comparables.

B. Sistema de Subselección

Aplicación

El Sistema de Subselección identifica aquellos equipos de una instalación industrial que proporcionan un mayor riesgo potencial.

La utilidad del método reside en que además de permitir conocer cuáles son los equipos de una instalación en los que se deben identificar escenarios de accidente, permite decidir sobre la necesidad de realizar Estudios de Seguridad de plantas industriales en función de los resultados obtenidos, tal como sucede en Holanda.

El rango de aplicabilidad del método se ciñe a aquellos elementos de la instalación que, ante incidentes, puedan ser técnica y funcionalmente aislables del resto mediante operaciones simples, y que involucren sustancias peligrosas, habida cuenta de sus características tóxicas, inflamables o explosivas. Por ello, será conveniente identificar escenarios de accidente en otras unidades para las que el método no sea de aplicación.

Descripción

Se hace uso de un índice de peligrosidad, basado en parámetros como el "valor umbral" o el "factor circunstancial" que cuantifican tanto las características de la sustancia presente en el equipo (toxicidad o inflamabilidad) como las condiciones en las que ésta se encuentra en el proceso (presión y temperatura), así como la cantidad de sustancia presente en cada equipo.

La primera etapa del método consiste en determinar los equipos de la instalación a los que se debe aplicar, y que por tanto, serán equipos susceptibles de ser aislados mediante operaciones simples.

A continuación, se debe caracterizar cada uno de estos equipos por medio del denominado "Número de Designación", EVR. Éste se calcula en base a tres parámetros:

- Cantidad de sustancias presentes en cada equipo.
- Factor circunstancial. Cuantifica las condiciones en que la sustancia se encuentra en la instalación. Su valor depende de:
 - La clase de equipo considerado, distinguiendo entre recipiente de almacenamiento y proceso.

- La localización del equipo, diferenciando en función de que se encuentre en un lugar cerrado o en el exterior y evaluando, a su vez, la relación existente entre la temperatura de proceso y la de ebullición de la sustancia.
- El valor de la presión en almacenamiento.
- Valor umbral. Es la cantidad de sustancia que, ante fuga instantánea, pueda ocasionar graves daños en las personas que estén presentes en un radio de 100 m del punto de emisión. Su valor depende de que la sustancia pertenezca a la categoría de inflamable, explosiva, tóxica o extremadamente tóxica.

Una vez calculado el "Número de Designación" para cada uno de los equipos identificados, se cuantifica la peligrosidad relativa de cada uno de ellos.

Para ello, se identifican una serie de localizaciones en el perímetro y entorno de la instalación industrial, calculando el denominado "Número de Selección", S, que origina en cada una de las localizaciones cada equipo seleccionado.

El valor del "Número de Selección" depende del carácter de la sustancia, tomando los valores siguientes:

- Para sustancias tóxicas: **$S = X^2 \times EVR$**
- Para sustancias inflamables: **$S = X^3 \times EVR$**

El método sólo considera relevantes aquellas sustancias inflamables cuya temperatura en el equipo sea superior a su punto de inflamación.

El valor de la X, denominada distancia corregida, se obtiene al dividir 100 entre la distancia en metros existente entre el equipo y la localización seleccionada. Para $X > 1$, se tomará $X = 1$.

El número de localizaciones seleccionadas no será en ningún caso inferior a 8, situadas en el perímetro de la instalación y distantes menos de 50 m entre sí. Éstas se completarán con otras situadas en los márgenes opuestos de ríos o costas, si éstas limitan con la instalación, así como en las zonas residenciales del entorno de la instalación.

Una vez calculado el número de selección para cada uno de los equipos en cada una de las localizaciones establecidas, se considerarán escenarios de accidentes en aquellos equipos que resulten, para alguna de las loca-

lizaciones, con un $S > 1$ y además cumplan que $S > 0,5 \times S_{\max}$. (siendo S_{\max} el mayor valor de S originado por uno de los equipos en la localización).

Asimismo, se contemplarán escenarios de accidente en aquellas partes de la instalación que originen un valor de $S \geq 1$ en cualquiera de las localizaciones seleccionadas en áreas residenciales del entorno.

Tal como se desprende de la descripción anterior, el método es muy útil para conocer los equipos a incluir en la identificación de escenarios relativa a Estudios de Seguridad y Análisis Cuantitativos de Riesgos, al contemplar no sólo el ranking relativo entre equipos característicos de otros índices de riesgos, sino también la seguridad de las personas en el entorno, al considerar la posición de los equipos frente a las zonas residenciales exteriores a la instalación.

2.5. MÉTODOS CUANTITATIVOS

Son técnicas de análisis críticos que incluyen estructuras y cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (siniestros) a partir de los valores individuales de la probabilidad de fallo que corresponde a los elementos (equipo y humanos) implicados en los procesos (industriales en nuestro caso).

Las herramientas fundamentales de estos métodos son:

- La lógica matemática: Estructuras lógicas y relaciones entre sus elementos.
- Estadísticas de frecuencia de ocurrencia de fallos y fiabilidad de equipos.
- Cálculos de probabilidades de interacciones entre sucesos.

Datos para métodos cuantitativos

La gran potencia de los métodos cuantitativos, así como su utilidad para conectar el origen y destino del accidente, se ve ensombrecida cuando hay que alimentar los modelos con datos relativos a las probabilidades de fallos. Por una parte hay diversidad de elementos y equipos con características variadas. Por otra parte hay una gran diversidad en los tipos de averías. Tales diversidades complican el tratamiento probabilístico de los datos.

Otra dificultad estriba, en el caso concreto de la industria química, en que no hay mucha cantidad de datos y en que la calidad de los mismos puede verse afectada por diversidad de criterios a la hora de recogerlos e interpretarlos. No obstante, hay datos procedentes de otros sectores (nuclear, electrónico, plataformas marinas, etc.) que cabe aprovechar en nuestro campo de interés.

En la interpretación de los datos probabilísticos, siempre surgen las mismas preguntas:

- ¿es mi equipo igual de fiable que el modelo probabilístico?
- ¿Cómo mejora su fiabilidad al aumentar el mantenimiento?
- ¿Están condicionados los datos de fiabilidad con datos procedentes de países no desarrollados?

Evidentemente, todo ello no hace más que ahondar en un mismo hecho: Probablemente los datos estadísticos existentes no sean totalmente aplicables al caso suyo, pero es lo más cercano y fiable de lo que se dispone.

Teoría probabilística de fallo

La teoría probabilística trata de manera diferente a aquellos elementos que funcionan de una manera continua frente a los que lo hacen de forma esporádica.

a) Elementos o sistemas que funcionan de manera continuada.

Para ellos, puede considerarse que todo componente, tras un período de tiempo determinado, fallará, definiéndose de esta manera los siguientes conceptos:

- Función probabilidad de fallo, $P(t)$: Probabilidad de que un componente que funciona satisfactoriamente en $t=0$ falle en el intervalo de tiempo de 0 a t .
- Función fiabilidad, $R(t)$: es el complementario de $P(t)$, es decir, la probabilidad de que sistema no falle en el intervalo de tiempo de 0 a t .

$$R(t) = 1 - P(t)$$

- Función densidad de fallos: $f(t)$

$$f(t) = \frac{dP(t)}{dt} - 1$$

- Ratio de fallo, $\lambda(t)$: probabilidad de que un elemento falle en el instante t , dado que ha funcionado sin fallos hasta ese momento (también llamada tasa media de fallo en un determinado período). La distribución de $\lambda(t)$ frente al tiempo tiene la forma típica indicada en la figura (Bath-tub curve).

Así, en la zona de $\lambda(t) = cte = \lambda$, se tiene:

- Fiabilidad $R(t) = e^{-\lambda t}$ (Distribución de Poisson).

- Probabilidad de fallo: $P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.
- Densidad de fallo: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

Además, si $\lambda t < 0,001$, entonces:

- $P(t) \approx \lambda t$.
- $P_{a+b}(t) = P_a(t) + P_b(t)$.

- b) Elementos o sistemas que funcionan de manera esporádica.

Se refieren a sistemas tales como bombas de reserva, válvulas de seguridad, enclavamientos, etc. El concepto básico consiste en la probabilidad de fallo por demanda, Qd: Probabilidad de que falle en el momento en el que se solicita la actuación del elemento.

Cuantificación de árboles de fallo

A la hora de realizar la cuantificación de los árboles de fallo, habrá que considerar si éstos se componen únicamente de sucesos básicos, o si por el contrario disponen de sucesos intermedios, a los que se asocian los modos de fallo característicos del árbol:

- a) Árboles que no contienen sucesos intermedios. Para ellos, se aplican los siguientes criterios:
- i) Asociaciones en serie (tipo OR)
 $P = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2)$
 $R = R_1 \cdot R_2 (<R_1, R_2)$
 - ii) Asociaciones en paralelo (tipo AND)
 $P = P_1 \cdot P_2 (<P_1, P_2)$
 $R = 1 - (1 - R_1) (1 - R_2)$
- b) Árboles de fallos para los que se hayan definido sucesos intermedios. Para éstos, la probabilidad de fallo del suceso final se determina en función de las probabilidades asociadas a los modos de fallo definidos, considerando para dichos modos de fallo las reglas anteriores sobre cuantificación de árboles de fallo (ver caso práctico).

Una vez enunciadas las herramientas, avancemos qué resultados pueden obtenerse. Cualitativamente podremos: esquematizar como se desarrolla un suceso; identificar puntos débiles del sistema; plantear revisiones de diseño, etc. Mediante la simplificación, además, podrán determinarse los modos de fallo de una instalación, cuáles han de considerarse críticos, etc. La cuantificación, por otra parte, permite determinar la probabilidad de fallo global, el número de veces que puede esperarse que ocurra el suceso en un determinado período, etc.



RESUMEN DE INTERACCIONES ENTRE SUCESOS

PROBABILIDAD DE FALLO


$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$$

FIABILIDAD

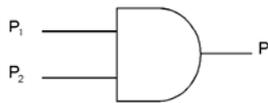

$$R = R_1 R_2$$

$$R = \prod_{i=1}^n R_i$$

TASA DE FALLO

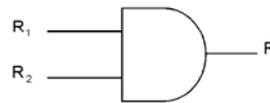

$$\hat{\lambda} = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

(EL FALLO DE UN COMPONENTE SUPONE EL FALLO DEL SISTEMA)


$$P = P_1 P_2$$

$$P = \prod_{i=1}^n P_i$$



$$R = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$$

$$R = 1 - \prod (1 - R_i)$$

$$\lambda = (-L_n R) / t$$

(EL FALLO DEL SISTEMA REQUIERE EL FALLO DE AMBOS COMPONENTES)

2.5.1 ANÁLISIS CUANTITATIVO MEDIANTE ÁRBOLES DE FALLOS

Se trata evidentemente de una metodología similar en cuanto a su desarrollo a FTA, ya analizada con los métodos cualitativos.

Mediante la aplicación cuantitativa de los árboles de fallo, y una vez localizadas las probabilidades de ocurrencia de los Sucesos Básicos Inicidores, se consigue cuantificar en términos probabilísticos la frecuencia de ocurrencia del Suceso Final.

De la misma forma, el método permite el Análisis probabilístico de los conjuntos mínimos de fallos (CMF), y en base a ello determinar cuales son críticos para la instalación.

2.5.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO MEDIANTE ÁRBOLES DE SUCESOS

También en este caso se trata de la misma metodología ya analizada en los Métodos Cualitativos, pero a la que se incorpora el tratamiento probabilístico a través de la aplicación de las probabilidades de ocurrencia de la disyuntiva de los sucesos básicos iniciadores, los sucesos intermedios y los factores condicionantes.

2.6. RESUMEN DE LAS TÉCNICAS PRESENTADAS

A modo de resumen se presenta una tabla con los criterios de selección de los métodos recomendados por Protección Civil para las técnicas más complejas de las citadas, donde se tienen en cuenta factores generales como el tamaño de la plantilla total, así como algunos aplicables a cada unidad objeto de estudio. Entre estos destacan factores importantes como la vulnerabilidad del entorno, o la fase operativa que se tenga en cuenta.

Como puede verse, el método HAZOP es altamente recomendado para diseños nuevos con niveles de riesgo intrínseco elevado, a pesar de ser una técnica compleja en su aplicación.

De todas formas conviene resaltar que es aconsejable recurrir a varias de las técnicas citadas para obtener una identificación más completa.

**TABLA 2.9
CRITERIOS ACONSEJADOS POR PROTECCIÓN CIVIL**

TÉCNICA DE IDENTIFICACIÓN	PLANTILLA	CANTID. ALMACEN.	TIPO DE PROCESO	CONDIC. ALMACENAM. OPERACIÓN	CONTROL	EDAD	AMPLIACIÓN/ MODIFICAC.	VULNER.	FASE OPERATIVA	DISEÑO.
	1. >250 p 2. >500 p	1. import. 2. medio 3. pequeño	1. continuo 2. Batch	1. muy severas 2. severas 3. poco severa	1. distrib.	1. nueva 2. antigua 3. proyec.	1. ampliacion. 2. modificacion.	1. poco 2. medio 3. mucho	1. puesta en marcha 2. arranque 3. normal 4. parada	1. nuevo 2. antiguo
Listas de chequeo	-	3	2	3	1	2	2	1, 3	1, 2, 4	-
Análisis histórico de accidentes	1, 2	1, 2, 3	1, 2	1, 2, 3	1	1, 2, 3	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	-
Análisis FMECA	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Análisis del riesgo preliminar (PHA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Análisis What if?	-	3	2	3	1	2	2	1, 3	1, 2, 4	-
HAZOP	-	1, 2	1	1, 2	-	1, 3	1	2, 3	3	1

2.7 CASOS PRÁCTICOS DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

2.7.1 CASO PRÁCTICO DE MÉTODO DE SUBSELECCIÓN

Tal como se ha indicado, el Método de Subselección identifica los equipos de una instalación que proporcionan un mayor riesgo potencial, pudiendo ser empleado como herramienta de decisión sobre la necesidad de realizar Estudios de Seguridad a instalaciones industriales.

Para su aplicación, lo primero es determinar los equipos de la instalación susceptibles de ser aislados mediante operaciones simples para que sean evaluados por el método. En el presente caso práctico (ver Figura 2.4), se tendrán como equipos a evaluar los tanques de hexano (H1, H2 y 3), los tanques de tolueno (T1 y T2) y la esfera de GLP.

A continuación se caracterizan los equipos por medio del denominado "Número de designación" (EVR), calculado en base a tres parámetros:

- Cantidad de sustancia presente en el equipo.
- Factor circunstancial, que cuantifica las condiciones en que la sustancia se encuentra en la instalación:
 - Tanque de almacenamiento o de proceso.
 - Localización en área cerrada, en cubeto o en el exterior.
 - Relación entre la temperatura de ebullición y de almacenamiento.
 - Presión en el almacenamiento.
- Valor umbral, es decir, cantidad de sustancia que ante fuga instantánea, puede ocasionar daños a las personas situadas a una distancia de 100 m. Su valor depende del carácter de la sustancia siendo de 10.000 para las inflamables y de 3.000 para las tóxicas.

En la Tabla 2.10 se indican los valores del EVR para cada una de las unidades evaluadas, que resultan ser: Hexano: 2,0; Tolueno: 0,1; GLP: 75.

Una vez calculado el EVR para cada uno de los equipos identificados, se cuantifica la peligrosidad relativa de cada uno de ellos.

FIGURA 2.4

LOCALIZACIONES SELECCIONADAS PARA EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE SELECCIÓN

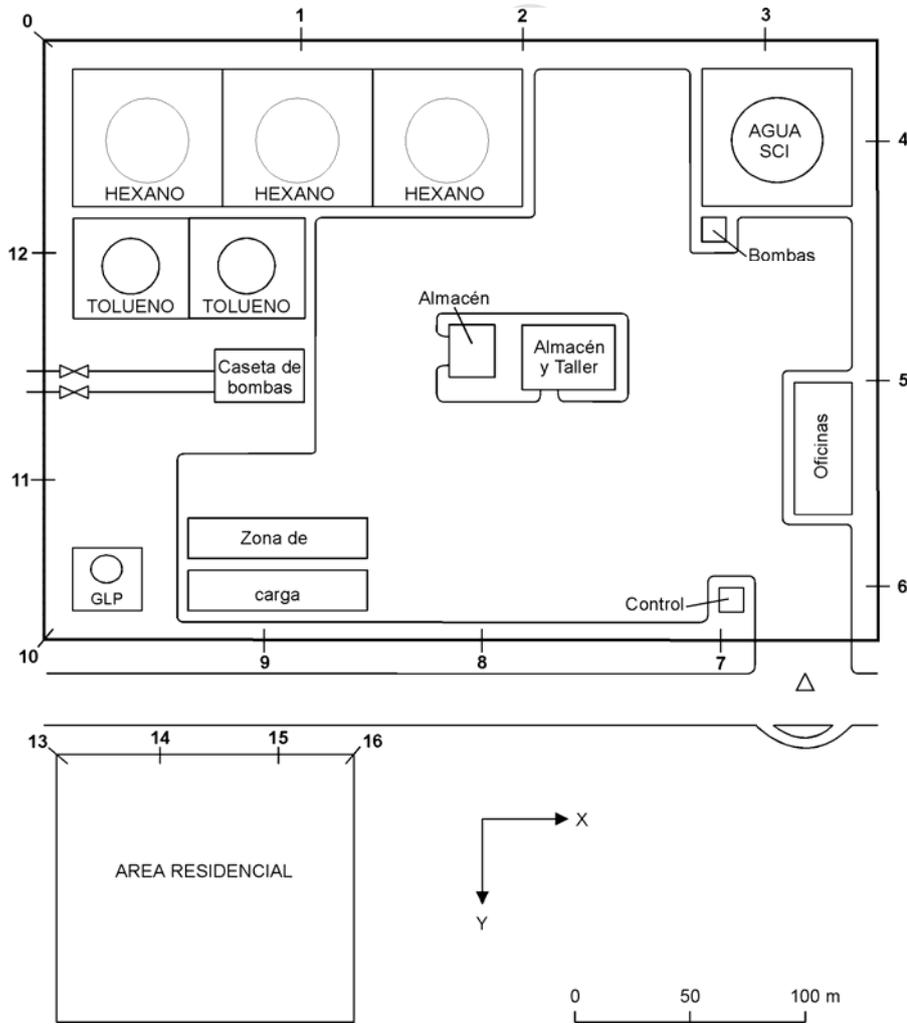


TABLA 2.10

CALCULO DEL NUMERO DE DESIGNACION, EVR

Parte de la Inst.	Masa (t)	M	F	P	O.F.	Presión (bar _a)	Temp. (°C)	Temp. ebul. (°C)	Ts	B	LC50 (mg/Nm ³)	Subfac. EVR	Valor umbral (kg)
Tanque hexano	12.350	0	1	3	1	0,16	20	69	0	1	100.000	2,0	10.000
Tanque tolueno	3.250	0	1	3	1	0,03	20	110,6	0	1	100.000	0,1	10.000
Esfera GLP	750	0	1	3	1	8,32	20	-42,1	0	1	100.000	75,0	10.000

M = mezcla ; 0 = compuesto puro,
 1 = mezcla,
 F = fase ; 0 = gas,
 1 = líquido,
 P = localización ; 2 = sólido,
 1 = interior, ; 0 = exterior,
 O.F. = función en operación ; 2 = doble concentración, 3 = cubeto
 almacenamiento, ; 0 = proceso,
 punto de fusión ; 0 = < 25°C,
 > 25°C

Para ello, se han identificado 17 localizaciones en el entorno de la instalación, 4 de las cuales (13, 14, 15 y 16) corresponden con el área urbanizada según se recoge en la figura. En cada una de ellas se calcula el número de selección, S, que origina cada equipo.

El valor de S depende del carácter de la sustancia, tomando los valores siguientes:

- Sustancias tóxicas: $S = X^2 \cdot EVR$
- Sustancias inflamables: $S = X^3 \cdot EVR$

En este sentido, sólo se consideran inflamables las sustancias que se encuentran a una temperatura superior a su punto de inflamación.

X es la distancia corregida, obtenida de dividir 100 por la distancia en metros entre la unidad evaluada y la localización seleccionada. Para $X > 1$, se considera $X = 1$.

Una vez calculado S, se deben identificar escenarios en aquellos equipos que resulten, para alguna de las localizaciones, con $S > 1$ y $S > 0,5 \cdot S_{\text{máx}}$ (siendo $S_{\text{máx}}$ el mayor valor de S originado por los equipos en cada localización).

Asimismo, se contemplan escenarios en las unidades que provoquen $S \geq 1$ en cualquiera de las localizaciones seleccionadas en áreas residenciales del entorno.

En la Tabla 2.11 se recogen los valores de S obtenidos en cada una de las localizaciones, señalándose en sombreado aquellos valores de S que llevan a considerar escenarios en las unidades correspondientes.

Estos, han resultado para los tanques H2 y H3 de hexano y la esfera de GLP.

Como se desprende de la aplicación del método, éste no sólo considera una escala de riesgos entre los equipos existentes en la instalación, en función del valor EVR asociado a las condiciones de almacenamiento, la cantidad de sustancia y su peligrosidad, sino también la influencia que tiene la disposición de los diferentes equipos respecto de los límites de la instalación y las áreas residenciales del entorno, principal aportación del método.

TABLA 2.11
RESULTADOS DEL CALCULO DEL NUMERO DE SELECCION, S

Equipos	X	Y	T/I	EVR	LOCALIZACION																					
					Nº	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
					X	Y																				
H1 hexano	0,04 2	0,044	I	2,0	2,0	2,0	0,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	2,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,14 0,32
H2 hexano	0,10 6	0,044	I	2,0	1,3	2,0	1,8	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	1,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
H3 hexano	0,17	0,044	I	2,0	0,4	2,0	2,0	0,8	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T1 tolueno	0,03 6	0,106	I	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
T2 tolueno	0,08 8	0,106	I	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Esfera GLP	0,02 6	0,246	I	75	5,0	4,4	2,7	1,5	1,3	1,8	2,0	3,6	13,8	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	23,0	75,0	75,0	75,0	75,0	47,1	28,1

2.7.2 CASO PRÁCTICO DE ÁRBOLES DE SUCESOS

Un árbol de sucesos es un modelo expresado de forma gráfica y lógica que identifica y cuantifica posibles desarrollos que siguen a un suceso iniciador. Se trata pues de un método inductivo que describe sistemáticamente la secuencia temporal de la propagación del suceso. Se distinguen dos aplicaciones:

- Desde un punto de vista preventivo, cómo actúan los sistemas de protección, el funcionamiento de la planta y la intervención de los operadores antes de que se produzca un incidente (aplicación preincidental).
- Una vez que se ha producido el accidente, muestra el abanico de posibles consecuencias que de él pudieran derivarse (aplicación postincidental).

Las dos aplicaciones han de considerarse complementarias. De hecho el árbol de sucesos postincidental podría "colgarse" de aquellas ramas del árbol preincidental que derivan en fallo del sistema de seguridad.

La metodología de árbol de fallo, objeto del punto siguiente, puede aplicarse en árboles de suceso, por ejemplo, para modelar cada desarrollo en la secuencia incidental. Para fijar ideas puede ser interesante remarcar las diferencias de significado del término "suceso iniciador" en los árboles de fallos y de sucesos. En el árbol de fallo pueden haber muchos sucesos iniciadores que llevan al suceso cabecera; sin embargo, un árbol de suceso sólo tendrá uno iniciador que llevará a varios posibles desarrollos.

Técnica de construcción de árboles de sucesos:

1. Identificación del suceso iniciador.

El suceso iniciador, en la mayor parte de los casos, será una liberación accidental de una sustancia tóxica o peligrosa. Este suceso iniciador se identifica utilizando cualquiera de los métodos de identificación de escenarios: HAZOP, base de datos histórica, experiencia del analista, etc. Ejemplos de suceso iniciadores: grieta en una tubería, rotura catastrófica de un tanque, salto de válvula rompedora de vacío.

2. Identificación de los factores de riesgo y determinación de los posibles sucesos.

Un factor de riesgo es cualquier parámetro modificador que cambia el tipo de suceso final al que llega un accidente. Algunos factores de riesgo que son típicamente utilizados en la definición de árboles de sucesos son:

- La ignición o no de una sustancia inflamable.
- El grado de confinamiento en el que se encuentre una nube de sustancia inflamable.
- El confinamiento de una fuga líquida en cubeto o no.
- El período del día en el que ocurre el accidente.
- Las condiciones meteorológicas.
- La actuación de válvulas de corte o detectores.

La mayor parte de los factores de riesgo son binarios, es decir sólo permiten dos opciones (SI/NO, OCURRE/NO OCURRE), aunque otros, como las condiciones meteorológicas, pueden consistir en rangos de opciones: de velocidad de viento, estabilidad atmosférica y dirección de viento.

Los factores de riesgo deben de incluirse en el árbol de sucesos en estricto orden cronológico y debe de utilizarse una etiqueta que se coloca en la parte superior del árbol de fallos para nombrar cada factor de riesgo.

3. Construir el árbol de sucesos.

El árbol de sucesos representa cronológicamente la progresión de un accidente. Empezando desde el suceso iniciador, el árbol de sucesos se construye de izquierda a derecha. En cada encabezado o nodo, se analizan las dos o más alternativas que permita cada factor de riesgo considerado. Sólo los nodos que afectan al suceso final deberían de mostrarse explícitamente en cada rama. Cada rama del árbol finaliza en un suceso final que corresponde generalmente a alguno de los siguientes: BLEVE (bola de fuego), UVCE, flash fire, jet fire, pool fire, dispersión de un producto tóxico o suceso sin consecuencias. La descripción de cada uno de estos sucesos finales se realiza en el siguiente capítulo.

Si el factor de riesgo es binario, por convenio se sitúa la rama correspondiente a la opción de "SI" en la parte superior de la bifurcación y, en consecuencia, la rama con la opción "NO" se sitúa en la parte inferior.

4. Clasificación de los sucesos.

El objetivo final que se pretende al construir un árbol de sucesos es identificar los efectos finales que para cada accidente identificado han de estudiarse para realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgo o el Estudio de Seguridad de la instalación. De forma que si el objetivo del estudio es determinar el riesgo de posible letalidad en el exterior de una industria, sólo aquellos sucesos que puedan provocar esas consecuencias deben seleccionarse.

Para estimar la probabilidad de cada desarrollo se emplean bases de datos contrastadas y como herramienta básica la teoría de probabilidad (probabilidad condicionada). En ese caso podrán realizarse árboles cuantitativos y cualitativos.

A continuación se presenta un árbol de sucesos representativo de la modalidad enfocada a las respuestas de sistemas de control u operadores de planta. En el próximo Capítulo se incluirá un modelo de árbol posaccidental, como paso previo al cálculo de efectos y consecuencias.

Arbol de suceso enfocado a los medios de actuación

Como representativo de tales árboles de suceso, se presenta el árbol de sucesos correspondiente a una fuga en una de gas inflamable, aguas abajo de un depósito pulmón. El sistema cuenta con una válvula de seguridad conectada a antorcha, disponiendo asimismo de 2 válvulas operables desde Sala de Control de cierre de la línea (válvula B) y de apertura a antorcha (válvula A).

Para su construcción, se han considerado diferentes posibilidades:

- A: Se trata del suceso inicial, correspondiente a la fuga en la línea de gas. Se considera que la mitad de la línea se encuentra aguas abajo de la válvula B.
- B: Si la fuga se produce aguas abajo de la válvula de aislamiento, la fuga podrá ser cortada siempre que el operador actúe de manera adecuada y no se produzca el fallo de la válvula.
- C: Considera la probabilidad de que el operador actúe de manera adecuada, una vez que se ha generado una situación de riesgo

como la correspondiente a una fuga (la probabilidad de fallo ha sido determinada según el método de Teseo, según se indicó anteriormente).

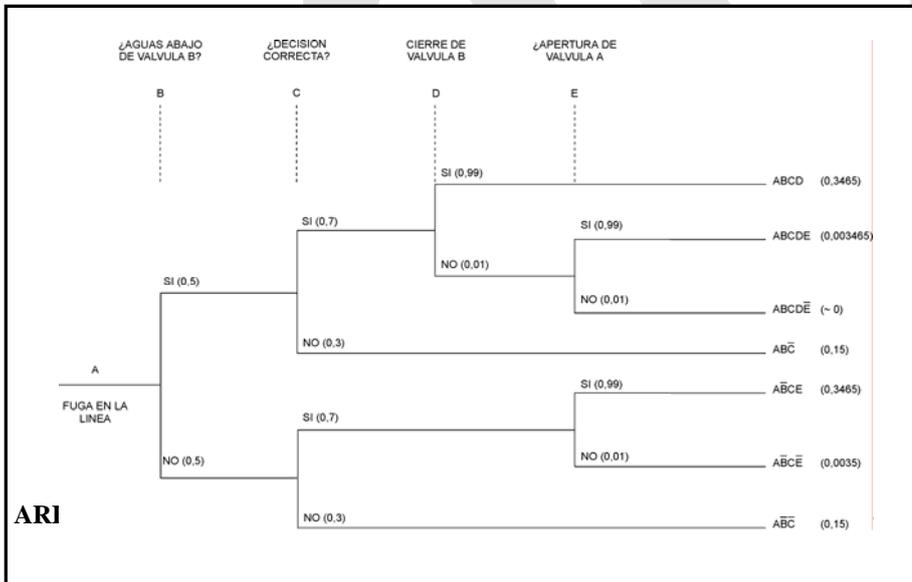
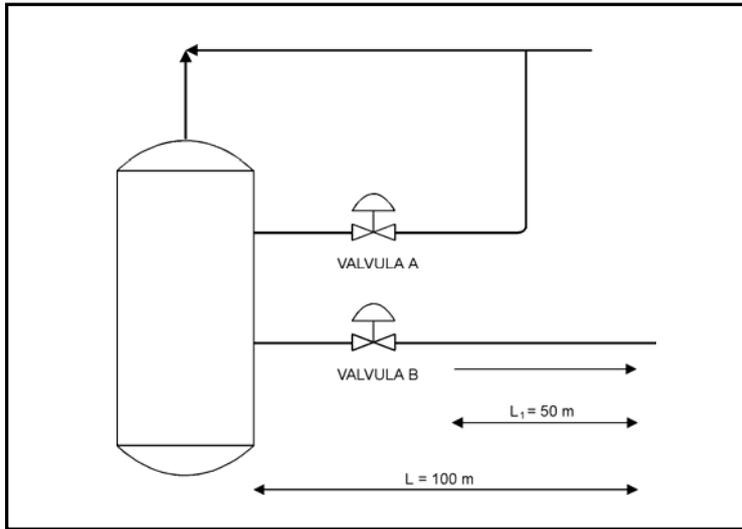
- D: En caso de que se produzca la operación de la antorcha, se retirará parte del inventario de gas del sistema, disminuyendo, de esta forma, la magnitud de las consecuencias generadas.
- E: Considera el posible fallo o actuación correcta de la válvula de aislamiento.

Con todas estas posibilidades, el árbol de sucesos, con las probabilidades asociadas a cada evolución accidental, es el indicado.

Los posibles accidentes consisten en:

- Fuga hasta que se produce el cierre de la válvula B. Es el suceso al que corresponden las menores consecuencias.
Suceso: ABCD. Prob.: 0,3465.
- Fuga en la línea, repartiéndose el inventario entre lo que va a la fuga y lo que se manda a antorcha, una vez que se ha abierto la válvula A.
Sucesos: ABCDE + ABCE. Prob.: ~ 0,35.
- Fuga del total inventario a través de la línea (Suceso más grave).
Sucesos: ABCDE + ABC + ABCE + ABC. Prob.: 0,3035.

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS



2.7.3 CASO PRÁCTICO DE ÁRBOLES DE FALLOS

A) Introducción

El objetivo perseguido con el desarrollo de este caso práctico es poner de manifiesto mediante un ejemplo simple la utilidad, aplicabilidad así como las limitaciones de la metodología de análisis del árbol de fallo en el campo de la Seguridad Industrial.

Como se ha indicado con anterioridad, el análisis del árbol de fallo es un método deductivo (sistemático y lógico) para identificar esquemáticamente los caminos en los que la interacción entre sucesos pueden derivar en accidentes.

El análisis comienza con la definición precisa de un accidente o *suceso* final ("top event") y estudia, retrocediendo, las diversas situaciones que pueden ocasionar el accidente definido, evaluando *sucesos intermedios* y *sucesos básicos*. Estos tendrán esta consideración en base a la información que se disponga o al nivel de detalle requerido en la resolución, de forma que un mismo suceso, por ejemplo "fallo en válvula automática", podría considerarse como **básico**, o bien, si se analiza con más detalle para ver cuáles pueden ser sus causas originadoras, considerarlo como **intermedio** (fallo causado, por ejemplo, por el "fallo en el elemento actuador de la válvula").

Es importante señalar que no deben evaluarse sólo fallos de instrumentos, sino que han de considerarse asimismo, fallos humanos, acciones del entorno, de la organización, etc.

Se trata en definitiva de analizar las interacciones entre los elementos de un sistema o proceso que pueden derivar en un suceso o accidente. En este sentido, hay que destacar que lo usual es que el accidente sea el resultado de complicadas interacciones entre sus elementos constituyentes, de ahí que se recurra a un estudio sistemático que permita ir abordando causas, explicando así el suceso en cuestión. Básicamente la naturaleza de la interacción entre los componentes puede establecerse en los siguientes modos lógicos:

- Función lógica AND: Según este modo de interacción, para que se produzca el fallo del sistema, se requiera el fallo **simultáneo** de

todos y cada uno de sus componentes. Se corresponde con asociaciones en paralelo, típica de sistemas redundantes, que se caracterizan por un aumento de la seguridad del sistema.

Como ejemplo, cabe citar el uso de una doble alarma de alta temperatura en un reactor con objeto de evitar excursiones de temperatura. Con dicha disposición, para que se produzca el runaway de la reacción, se requerirá el fallo simultáneo de ambas alarmas de alta (el uso de redundancia, no obstante, plantea sus problemas: si existe un número demasiado alto de alarmas, es previsible que se produzcan un mayor número de fallos de éstas, provocando de esta forma, numerosas operaciones de arranque/parada, a las que suelen asociarse problemas de seguridad).

- Función lógica OR: Según este modo de interacción, para que se produzca el fallo del sistema, basta con que se produzca el fallo de **uno** de sus componentes. Se corresponde con asociaciones en serie. El ejemplo más usual, aplicado a un sistema de alivio de presión, es el de colocar un disco de ruptura en serie con una válvula de seguridad.

Según esta disposición, basta con que UNO de ambos elementos no abra a su presión de consigna para que se produzca el fallo del sistema, por lo que la probabilidad calculada de que se produzca el fallo del sistema es mayor que la de que falle cada uno de sus componentes (la razón de tal asociación, no obstante, es la protección de la válvula de seguridad cuando el fluido pueda causar corrosión).

- Función lógica NOT: Significa la negación de la ocurrencia de un suceso.

De esta manera, utilizando funciones lógicas podemos esquematizar y "conectar" el suceso en cuestión con los sucesos intermedios y básicos.

La aplicación de la metodología del árbol de fallos para una situación accidental de la más simple de las plantas puede desarrollarse y complicarse enormemente, involucrando un gran número de sucesos intermedios. Será necesario, por lo tanto, saber:

- Qué perseguimos con el análisis y con qué datos contamos.

- Qué validez tienen los datos manejados, al tiempo de recurrir a herramientas que faciliten la obtención de los resultados. Entre estas herramientas, se presentan los fundamentos del álgebra lógica o de Boole (de manera somera por tratarse de una rutina incorporada al programa LOGAN) y de la teoría de la probabilidad de fallo.

Algebra de Boole

El álgebra de Boole aporta un método para evaluar la conexión lógica entre variables. Se ha aplicado profusamente en el desarrollo de circuitos electrónicos; su aplicación original fue el razonamiento lógico. En el campo de la Seguridad Industrial sus aplicaciones más inmediatas pueden ser el análisis cualitativo de los árboles de fallo, aportando herramientas para su simplificación y la propia teoría de probabilidad de combinación de sucesos. Las variables a considerar son variables booleanas, es decir, variables que representan un suceso discreto dicotómico, dado que el suceso discreto ocurre o no ocurre, esto es: fuga o no fuga; válvula cierra o no cierra; bomba arranca o no arranca; el operador actúa o no actúa, etc. Los operadores básicos booleanos son los operadores o funciones lógicas AND, OR y NOT. Las operaciones entre variables booleanas verifican una serie de propiedades de las que se derivan una serie de reglas de simplificación. A continuación se exponen las reglas comúnmente utilizadas en la simplificación de árboles de fallos:

REGLAS PARA LA SIMPLIFICACION DE FUNCIONES BOOLEANAS

Conmutativa:

$$AB = BA$$

Asociativa:

$$A(BC) = (AB)C$$

$$A + (B+C) = (A+B) + C$$

Distributiva:

$$A(B+C) = AB + AC$$

$$A + BC = (A+B)(A+C)$$

Otras:

$$AA = A$$

$$A(A+B) = A$$

$$AA = 0$$

$$0A = 0$$

$$1A = A$$

$$\overline{A+B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

$$A + \overline{AB} = A + B$$

$$A + A = A$$

$$A + \overline{A}B = A$$

$$A + \overline{A} = 1$$

$$0 + A = A$$

$$1 + A = 1$$

$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$$

B) Caso práctico

El almacenamiento de hexano, esquematizado en la figura, dispone de un sistema de seguridad para prevenir el sobrellenado y evitar así las consecuencias que podrían derivarse de este suceso.

El sistema de seguridad consiste en un registro indicador de alto nivel en el panel del operador y en un sistema de parada automática por alto nivel que está conectado a una válvula solenoide (vs) que actuaría cortando la alimentación.

Con el nivel de detalle que permiten los datos que se adjuntan:

- i) Construir un árbol de fallos para el suceso "sobrellenado del tanque T-1 de hexano".
- ii) Determinar los caminos de fallo (modos de fallo) del sistema.
- iii) Estimar la probabilidad de fallo por sobrellenado y el número esperado de fallos en un año.
- iv) ¿Tendría que revisarse el sistema?

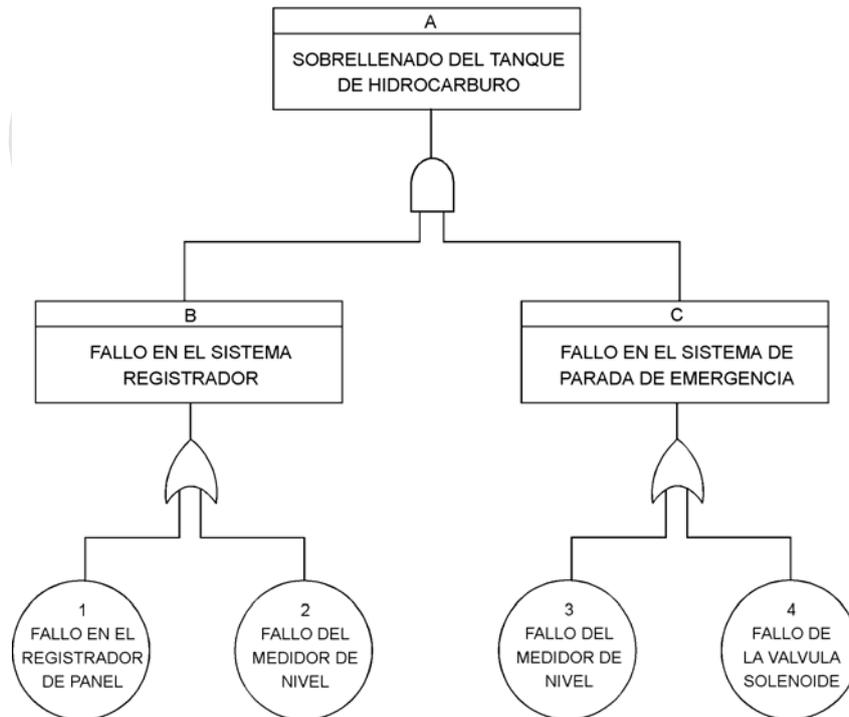
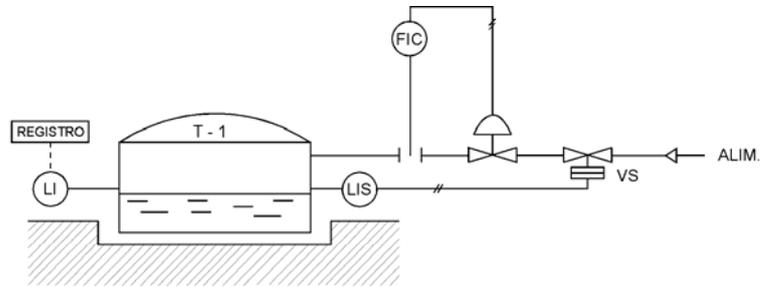
Datos**Tasa media de fallos de algunos componentes**

Componente	Fallos/año
Registro en panel	0,22
Medidor nivel (líquidos)	1,70
Válvula solenoide	0,42

Fuente: Lees, F.P "Loss prevention in the process industry"

Con formato: Inglés (Reino Unido)

i) Construir un árbol de fallos.



ii) Modos de fallos.

- Caminos en los que puede desarrollarse el accidente.

Simplificando el árbol de fallos (técnica de Fussell y Vesely) ¹.

Primer paso: Nombrar los sucesos elementales con números y el resto con letras.

Segundo paso: Escribir la letra correspondiente al suceso a estudiar.

Tercer paso: Una puerta AND incrementa el número de sucesos de un camino o modo de fallo; una puerta OR abre nuevos caminos o modos de fallo. El suceso A se sustituye en la misma fila por los sucesos B y C (puerta and).

Cuarto paso: El suceso B es el resultado de la interacción del 1 y del 2 con puerta OR, hay que añadir fila por nuevos caminos.

Quinto paso: Idem suceso C.

1^{er} Paso: Construcción del árbol.

2^o Paso: A

3^o Paso: A / **B** **C**

4^o Paso: A / B / C **1**
C **2**

5^o Paso: A / B / C / **1** **3**
C / **1** **4**
C / **2** **3**
C / **2** **4**

Modo de fallo: 1,3 ; 1,4 ; 2,3 ; 2,4

- Simplificación de árboles:

$$A = B \cdot C = \underbrace{(B = 1 + 2)}_{(C = 3 + 4)} = (1+2) \cdot (3+4) = 1 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 4$$

Con formato: Inglés (Reino Unido)

¹ Fussell, J.B. and Vesely W.E. "A new methodology for obtaining cut sets for fault trees."

iii) Probabilidad de fallo por sobrellenado y número de fallos esperado por año.

Con los datos disponibles se determina la probabilidad de cada suceso elemental

($P_i = 1 - e^{-\lambda_i t}$; $t = 1$ año):

$$P_1 = 1 - e^{-\lambda_1} = 1 - e^{-0,22} = 0,20; R_1 = 0,80$$

$$P_2 = 1 - e^{-\lambda_2} = 1 - e^{-1,70} = 0,82; R_2 = 0,18$$

$$P_3 = 1 - e^{-\lambda_3} = 1 - e^{-1,70} = 0,82; R_3 = 0,18$$

$$P_4 = 1 - e^{-\lambda_4} = 1 - e^{-0,42} = 0,34; R_4 = 0,66$$

El fallo identificado en el suceso B puede ocurrir por el fallo de cualquiera de los sucesos elementales 1 y 2, por lo que la fiabilidad asociada al sistema indicador es el producto de las fiabilidades de los sucesos elementales que pueden originarlo, según lo indicado anteriormente en relación a la cuantificación de sucesos intermedios (Análogo para los sucesos elementales de C):

$$R_B = R_1 \times R_2 = 0,14 \Rightarrow P_B = 1 - 0,14 = 0,86; \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = 1,92$$

$$R_C = R_3 \times R_4 = 0,12 \Rightarrow P_C = 1 - 0,12 = 0,88; \lambda = \lambda_3 + \lambda_4 = 2,12$$

Sin embargo, para que se produzca el sobrellenado han de fallar tanto el sistema de parada automática como el sistema registrador.

Dado que el suceso final no se compone de sucesos básicos, sino de los sucesos intermedios B y C, la cuantificación del suceso final precisa de la cuantificación de los modos de fallo.

Así, dado que $A = B \cdot C = 1x3 + 1x4 + 2x3 + 2x4$, se tendrá:

- $P(1x3) = P_1 \times P_3 = 0,164$
- $P(1x4) = P_1 \times P_4 = 0,068$
- $P(2x3) = P_2 \times P_3 = 0,672$
- $P(2x4) = P_2 \times P_4 = 0,278$

Con lo que tenemos que:

- $P_A = 1 - (1 - 0,164)(1 - 0,068)(1 - 0,672)(1 - 0,278) = 0,815 \Rightarrow R = 0,185$
 \Rightarrow el número medio de fallos se puede determinar de $\lambda = -\ln R = 1,69$ fallos en 1 año.

iv) Podrían proponerse variaciones en el diseño:

- Diversificar los fundamentos aplicados en la medida de nivel.
- Colocar alarma en zona de trabajo de operador.

2.7.4 CASO PRÁCTICO DE ANÁLISIS HAZOP

Los estudios de riesgo y operatividad (HAZard and OPerability studies, HAZOP) constituyen una de las técnicas más estructuradas para la identificación y prevención de los riesgos asociados a plantas de proceso.

El método se basa en analizar sobre los diferentes elementos de la instalación o nudos, el efecto que se asocia a desviaciones en los parámetros del proceso, por medio de unas determinadas palabras-guía.

Para la aplicación del método, se requiere información detallada del proceso (preferiblemente P & I) con objeto de analizar la relación entre los diferentes elementos de la instalación.

Para la aplicación al caso práctico, se analizará una esfera de GLP.

El sistema de alimentación del tanque de GLP se controla mediante alarmas de alto y bajo nivel, actuando sobre la válvula de alimentación, a su vez controlada por un medidor de flujo, contando, además, con alarma por alta y baja presión, así como sistema de purga y válvula de alivio, considerando diferentes posibilidades.

UNIDAD: TANQUE DE GLP (I)

Parámetro	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias	Reacciones del sistema	Acciones requeridas
Producto	Además de	Impurezas	<ul style="list-style-type: none"> - Amoniaco. - Aire. - Agua. - Cortes ligeros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosión de valvulería. - Formación de atmósfera explosiva. - Solidificación. - Aumento de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de presión: disparo vs o alarma de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificación de zonas sensibles a corrosión. - Análisis impurezas. - Eliminación fuentes de ignición. - Revisión vs.
	Otro	Producto diferente	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo operación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variación de presión. - Sobrellenado. - Reacción indeseada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alarma presión. - Disparo vs. - Exceso nivel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión manuales de operación. - Rediseño líneas de interconexión.
Caudal	Más ⁽¹⁾	Exceso de caudal de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo en válvula automática de control de flujo con válvula de bloqueo no operativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuga de producto. - Sobrellenado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tanque en operación sin control. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión válvula de control de flujo. - Válvula de bloqueo intrínsecamente segura.
Presión	Menos ⁽²⁾	Depresión en el tanque	<ul style="list-style-type: none"> - Fuga en línea de alimentación 	<ul style="list-style-type: none"> - Entrada de aire: formación de atmósfera explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento del caudal de alimentación. - Aumento del caudal de fuga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión de líneas. - Control de alimentación con sistemas de alarma.

⁽¹⁾ Ver Figura 1.

⁽²⁾ Ver Figura 2.

UNIDAD: TANQUE DE GLP (II)

Parámetro	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias	Reacciones del sistema	Acciones requeridas
Presión	Menos	Disminución de presión	<ul style="list-style-type: none"> - Fuga de producto. - Otros producto. - Vaciado de depósito. - Baja temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible entrada de aire. 		<ul style="list-style-type: none"> - Alarma de presión. - Revisión líneas de alimentación a depósito.
	Más	Incremento de presión	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrellenado. - Aumento de temperatura. - Fracciones más volátiles. - Otros producto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de presión. - Fuga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disparo vv alívio. - Refrigeración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alarma de presión. - Mantenimiento. - Dimensionado correcto sistema de refrigeración. - Verificado de producto. - Revisión de líneas de alimentación a depósitos.

UNIDAD: TANQUE DE GLP (III)

Parámetro	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias	Reacciones del sistema	Acciones requeridas
Presión	Más ⁽³⁾	Incremento de presión.	<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones ambientales. - Radiación exterior. - Solidificación ⁽⁴⁾ de vapor de arrastre en válvula de 	<ul style="list-style-type: none"> - Disparo válvula seguridad. - Activación válvula drenaje ante fallo válvula seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible solidificación en válvula drenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> - Duplicación válvula alivio y drenaje.
Caudal	No ⁽⁵⁾	Bloqueo en línea de inertizado.	<ul style="list-style-type: none"> - Condensación vapores LPG en tramo vertical de línea de inertizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de inertización en tanque. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible formación atmósfera explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rediseño de línea de inertización.

⁽³⁾ Ver Figura 3.

⁽⁴⁾ Ver Figura 4.

⁽⁵⁾ Ver Figura 5.

eoi