



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

METODOS PARA EL ANALISIS DE RIESGO

TESIS PROFESIONAL

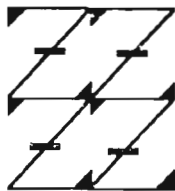
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

ROSALBA PEREZ RAMIREZ

UNAM
FES
ZARAGOZA



LO HUMANO EJE
DE NUESTRA REFLEXIÓN

DIRECTOR: ING. ENRIQUE TOLIVIA MELENDEZ

MEXICO, D. F.

ENERO 2005

m342996



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/057/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: PÉREZ RAMÍREZ ROSALBA
P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

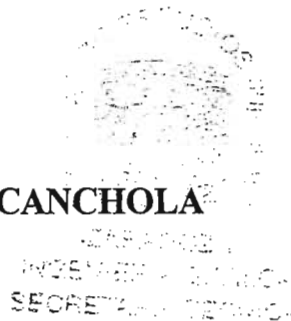
Presidente:	M. en I. Pablo Eduardo Valero Tejeda
Vocal:	I.Q. Enrique Tolivia Meléndez
Secretario:	I.Q. Judith Ventura Cruz
Suplente:	I.Q. Juan Carlos Prieto López
Suplente:	I.Q. Zula Genny Sandoval Villanueva

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
México, D. F., 24 de Noviembre del 2004.

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA



“Estoy convencido de que en este día somos dueños de nuestro destino, que la tarea que se nos ha impuesto no es superior a nuestras fuerzas, que sus acometidas no están por encima de lo que puedo soportar. Mientras tengamos fe en nuestra causa y una indeclinable voluntad de vencer, la victoria estará a nuestro alcance.”

Winston Churchill

“Ama no lo que eres,
sino aquello en lo que
te puedes llegar a convertir.”

Papá, mamá:
Gracias por su apoyo y amor

OBJETIVO:

**EXPLICAR CUALES SON Y EN QUE CONSISTEN LOS
DIFERENTES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO**

INTRODUCCIÓN

Durante los pasados 30 años, los temas sobre medio ambiente ocupan el primer lugar en la lista de las preocupaciones de la sociedad. Al mismo tiempo que el término "impacto ambiental" ha extendido su significado tradicional, principalmente referido a la contaminación del aire, agua y suelo, para incluir otros aspectos. Así, hoy día, en foros de debates medio ambientales, temas como el uso adecuado de las materias primas hasta las alteraciones al paisaje por un nuevo camino se discuten.

Dentro de este extenso concepto de medio ambiente, una especial sensibilidad se ha desarrollado en vista de la posibilidad de accidentes industriales los cuales, debido a su magnitud, son capaces de causar significativos daños a las personas, a la propiedad o al ambiente. Esta preocupación, que fue asociada en el pasado principalmente con la industria nuclear, hoy también incluye a la industria química, aún más después de los accidentes de Flixborough, Seveso y Bopal.

La calidad de vida que la sociedad ahora percibe no solamente la identifica con la cantidad de productos y servicios disponibles, también incluye la seguridad de las industrias que los produce. Las compañías han respondido, en general, a las demandas de la sociedad, lo que ha incrementado la aparición de programas de seguridad y medio ambiente los cuales gradualmente se extienden a la mayoría de la industria química. Sin duda, la presión legal ha contribuido a esta tendencia, pero no solamente es un justo reconocimiento a los Gobiernos, también ha sido importante el cambio de mentalidad en la industria con respecto a la seguridad.

Cualquier programa de acción diseñado para mejorar el nivel de seguridad de un proceso particular puede iniciarse por llevar a cabo un diagnóstico desde el principio, identificando las áreas más problemáticas y evaluando las alternativas disponibles. Esto es extremadamente difícil de llevar a cabo esta tarea usando solamente la experiencia y la intuición sin la ayuda de herramientas capaces de examinar los complejos problemas de seguridad que se encuentran en la industria química. El **Análisis de Riesgo** es la disciplina que responde a esta necesidad, combinando numerosas técnicas para dar una estimación cuantitativa del riesgo involucrado en un proceso dado.

La razón del presente trabajo es presentar una compilación general de los diferentes métodos para el Análisis de Riesgo. El texto está conformado por dos partes, la primera que explica los métodos cuantitativos de análisis de riesgo y la segunda que explica los métodos cualitativos; además de una sección introductoria que expone conceptos generales y una explicación de cómo se presentan los análisis de riesgo en Nuestro País.

INDICE

INTRODUCCIÓN	2
ÍNDICE	3
1. CONCEPTOS GENERALES	5
1.1 RIESGOS Y PELIGROS	7
1.2 ACCIDENTES Y ANÁLISIS DE RIESGO	7
1.2.1 CUANTIFICACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO	8
1.3 RETORNOS EN EL ANÁLISIS DE RIESGO	9
1.4 ETAPAS DE UN ANÁLISIS DE RIESGO	10
1.4.1 TOMA DE DECISIONES EN MATERIA DE SEGURIDAD INDUSTRIAL	15
2 ANÁLISIS DE RIESGO EN MÉXICO	16
2.1 MARCO LEGAL	16
2.2 LA EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL. CONCEPTOS BÁSICOS	18
2.3 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN	18
PRIMERA PARTE. METODOS CUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO	
1 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FRECUENCIAS	23
1.1 BASES MATEMÁTICAS	23
1.1.1 TEORÍA DE PROBABILIDADES	23
1.1.2 ESTADÍSTICA	30
1.2 FIABILIDAD: CONCEPTOS BÁSICOS	32
1.2.1 FIABILIDAD / DISPONIBILIDAD DE LOS DISTINTOS TIPOS DE COMPONENTES	32
1.2.2 TASA DE FALLOS	37
1.2.3 LEYES DE DISTRIBUCIÓN DE LA TASA DE FALLOS	39
1.2.4 FIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE UN SISTEMA	41
1.3 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE FALLO DE UN SUCESO BÁSICO	42
1.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	42
1.3.2 BANCOS DE DATOS DE FIABILIDAD DE COMPONENTES	45
1.3.3 DETERMINACIÓN DEL FALLO HUMANO	46
1.4 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE FALLO DE UN SUCESO COMPLEJO	52
1.4.1 MÉTODOS DEL ÁRBOL DE FALLOS	52
1.4.2 MÉTODO DEL ÁRBOL DE SUCESOS	61
1.4.3 MÉTODO DEL ANÁLISIS CAUSAS - CONSECUENCIAS	62
1.4.4 MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DEL FALLO DE MODO COMÚN	63
1.4.5. ANÁLISIS DE IMPORTANCIA	66
1.4.6 RESUMEN	66
2 MÉTODOS PARA EL CALCULO DE LOS ALCANCES DE DETERMINADOS EFECTOS	68
3 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE DAÑOS	71
4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO	72
4.1 CONCEPTOS GENERALES	72
4.1.1 RIESGO GLOBAL E INDIVIDUAL	72
4.1.2 RIESGO SOCIAL	72
4.1.3 RIESGO DE MUERTE Y DAÑOS	73
4.1.4 OTROS CONCEPTOS	73
4.2 CALCULO DEL RIESGO	74
4.3 CURVAS DE ISORIESGO	75
4.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DETERMINACIÓN DEL RIESGO	76
4.5 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	77
SEGUNDA PARTE: METODOS CUALITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO	
1 MÉTODOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS QUÍMICOS	80
1.1 MÉTODOS CUALITATIVOS	80
1.1.1 ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES	80
1.1.2 CHECK LISTS	83

1.1.3 ANÁLISIS PRELIMINAR DE RIESGOS	84
1.1.4 ANÁLISIS "WHAT IF? (¿QUÉ PASA SI?)"	86
1.1.5 ANÁLISIS FUNCIONAL DE OPERABILIDAD (HAZOP)	90
1.1.6 ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE LOS FALLOS (FMEA)	96
1.1.7 ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LOS FALLOS (FMEAC)	99
1.2 MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS	100
1.2.1 ÍNDICE DE DOW DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN	101
1.2.2 ÍNDICE MOND	107
1.3 OTROS MÉTODOS DE APOYO	120
1.3.1 REVISIÓN / AUDITORIA DE SEGURIDAD (SAFETY REVIEW)	120
1.4 RESUMEN	121
2. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN CUALITATIVA DE FRECUENCIAS DE OCURRENCIAS	124
2.1 ÍNDICES DE FRECUENCIA	124
2.1.1 MÉTODO UCSIP	124
2.1.2 OTROS MÉTODOS	131
2.2 ÁRBOLES DE FALLOS	131
2.3 ÁRBOLES DE SUCESOS	137
2.4 ANÁLISIS CAUSAS - CONSECUENCIAS	139
2.5 RESUMEN	142
3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN CUALITATIVA DE ALCANCES DE CONSECUENCIAS ACCIDENTALES	144
3.1 MÉTODO UCSIP	144
3.2 OTROS MÉTODOS	151
3.3 RESUMEN	152
CONCLUSIÓN	153
BIBLIOGRAFIA	159

1. CONCEPTOS BÁSICOS

Durante los últimos 50 años la industria química ha experimentado cambios a gran escala. Los avances tecnológicos han incrementado la aparición de nuevos materiales, procesos e incluso nuevos campos en la actividad industrial, hemos presenciado un incremento casi exponencial en el número y aplicación de productos químicos disponibles en el mercado. Cada año cientos de nuevos productos se agregan a la decenas de miles comercialmente disponibles. A pesar de la gran variedad de productos químicos, 90% del consumo se concentra solo en el 5% de los productos disponibles.

Grandes plantas químicas son comunes hoy día, la capacidad de algunas de ellas se ha incrementado en los últimos 20 años. Como es de esperarse, este crecimiento es, tanto en el número de plantas como en sus capacidades, esto implica un incremento en el número de personas (Tanto dentro de las planta como sociedad en general), quienes pueden sufrir las consecuencias de un accidente industrial. Debido a esto, ha aumentado el conocimiento en la seguridad industrial, conocimiento que se extiende a la sociedad en general. Los gobiernos han respondido a esta creciente preocupación social con esfuerzos importantes para regular las actividades industriales en general, y en particular aquellas que se consideran muy peligrosas.

Cuando se usa la estadística para expresar la probabilidad de accidentes, es apropiado comentar que la industria química posee la mejor estadística de accidentes de la industria en general. Comúnmente se utiliza el término FAR (Fatal Accident Rate), que establece el número de accidentes fatales en una industria en particular después de 10^8 horas de trabajo (periodo, que corresponde aproximadamente a la vida laboral de un grupo de 1000 trabajadores). Para la industria química el Índice FAR tiene valores entre 4 y 5.

En comparación la FAR para un grupo equivalente de trabajadores de las áreas de agricultura, minería y construcción son: 10, 12 y 64 respectivamente. Para ubicar el número de accidentes en la industria química dentro de este contexto es necesario tener en cuenta que en general alrededor del 80% de los accidentes pueden clasificados en un grupo no específico, tal como caídas, colisiones, contusiones, etc., de tal manera que solo alrededor del 20% de las fatalidades son causadas por riesgos específicamente asociados con la industria química. Otra manera de visualizar el nivel de probabilidad de accidentes al cual los trabajadores de la industria química están expuestos es el siguiente: 1) Un trabajador que pasa su vida laboral en un planta de 1000 trabajadores presenciara alrededor de 4 accidentes fatales en la planta. En comparación, alrededor de 20 trabajadores morirán en otro tipo de accidentes (principalmente en las carreteras o en sus hogares), y alrededor de 370 morirán como resultado de diversas enfermedades, incluyendo 40 muertes a consecuencia del tabaco.

La mayoría de los accidentes mencionados arriba son eventos aislados que involucran a una o más personas, casi siempre dentro de la planta. A pesar del hecho , antes mencionado, de que la industria química tiene una cantidad de accidentes menor que el de otras actividades industriales, la percepción de la sociedad es que la industria representa alto riesgo.

Sin duda, la principal causa de esta creencia son lo extendido de los efector y el impacto social de la mayoría de los accidentes, algunos de los cuales llegan más allá del límites físico de la planta en cuestión. La tabla 1.1 muestra algunos de estos accidentes de gran impacto.

TABLA 1 1 ALGUNOS ACCIDENTES NOTABLES OCURRIDOS DESDE 1973

Accidente	Consecuencias
<p>Flixborough (Inglaterra), 1 junio de 1974 En una planta de Nypro la ruptura de una tubería causó la descarga de entre 40 y 80 ton de ciclohexano líquido caliente. La nube resultante causó una poderosa y destructiva explosión.</p>	<p>28 muertes y cientos de heridos. Completa destrucción de la planta.</p>
<p>Seveso (Italia), 9 de julio de 1976 En la planta Icmesa (Hoffmann La Roche), una reacción descontrolada causó la fuga de entre 0.5 y 2 kg de químicos a la atmósfera. Una cantidad de entre 0.5 a 2 kg fue dioxina (TCCD). La dosis letal de TCCD por persona es de < 0.1 mg</p>	<p>Fue necesario evacuar a más de 1000 personas. No hubo muertes a consecuencia del accidente, pero la fuga de dioxina causó daño en la piel a muchas personas, provocó abortos y causó contaminación del suelo.</p>
<p>Campo de los Alfaques, San Carlos de la Rápia (España). 11 de julio de 1978 Un vagón de 30 toneladas, sobrecargado con 45 m³ de propileno causó una explosión BLEVE cuando se impactó contra un muro dentro del campo.</p>	<p>215 muertos</p>
<p>Cubatao (Brasil), 25 de febrero de 1974 Un oleoducto que transportaba gasolina se dañó, escapando la gasolina que al evaporarse se incendió causando una bola de fuego.</p>	<p>Al menos 500 muertos.</p>
<p>México D.F. (México), 19 de noviembre de 1984. Varios recipientes de LPG explotaron en San Juan Ixhuatepec.</p>	<p>452 muertes y más de 4200 lesionados. El número de personas desaparecidas podría ser 1000.</p>
<p>Bhopal (India), 17 de diciembre de 1984 Una fuga de gas tóxico (metil isocianato) ocurrió en una planta de Union Carbide que fabricaba insecticidas. La fuga se dispersó sobre un área de aproximadamente 40 km²</p>	<p>2500 muertes debidas a envenenamiento y aproximadamente el mismo número en una condición crítica. Aproximadamente 150 000 personas requirieron tratamiento médico. Los efectos a largo plazo fueron: ceguera, enfermedades mentales, hepáticas y daños a riñones, además de malformaciones en embriones.</p>
<p>Guadalajara (México), 23 de abril de 1992 Una cadena de explosiones a lo largo de 13 km del drenaje municipal ocurrida debido a un fuga de combustible líquido de una tubería propiedad de PEMEX</p>	<p>Información oficial reporto de 200 muertes y 1500 heridos. 1200 casa y 450 comercios destruidos.</p>

Es difícil cuantificar el costo de los accidentes de la industria química, incluso en términos puramente económicos.

Al costo material de los accidentes es necesario agregar el costo debido a la interrupción de la producción y la pérdida de materia prima, costos debidos a litigios e indemnizaciones por daño causado a personas o propiedad y el costo del pago de seguros.

Por lo anterior no es sorprendente observar un incremento en el esfuerzo de la industria en general, y en particular la química, para prevenir pérdidas.

Se estima que en Norte América la industria en su conjunto invirtió \$7700 mdd en 1985 en medidas de para incrementar los niveles de seguridad de las instalaciones y para proteger la salud de los trabajadores. Una parte muy significativa del total de esta inversión se realizó en la industria química, y por esto la probabilidad de accidentes fatales de los trabajadores de esta industria fue sólo un cuarto del promedio de los accidentes de los trabajadores de otras industrias en 1985.

1.1 RIESGOS Y PELIGROS

El término **riesgo** es frecuentemente usado para indicar la posibilidad de sufrir pérdida, o como una medida de la pérdida económica o daño a personas, expresada como el producto de la probabilidad de un incidente y la magnitud de sus consecuencias. Cuando usamos la palabra **peligro** para describir una condición física o química que tiene el potencial para causar daño a personas, propiedad o al medio ambiente.

1.2 ACCIDENTES Y ANÁLISIS DE RIESGO

Todos los accidentes descritos en la Tabla 1.1 caen dentro de la categoría de accidentes mayores. Por accidentes mayores entendemos cualquier incidente que implica una desviación intolerable de las condiciones de proceso a las cuales un sistema se diseña. Más específicamente son aquellos accidentes cuyos efectos podrían tener consecuencias adversas en vidas, salud, propiedad o el medio ambiente. En España, el Real Decreto 886/1988 sobre la prevención de accidentes mayores en ciertas actividades industriales (La versión española del también llamado Directiva Seveso CE) define accidente mayor a cualquier evento, tal como una emisión, derrame, fuga, fuego o explosión que sea consecuencia del desarrollo incontrolable de una actividad industrial que conduzca a una situación de riesgo serio, catástrofe o calamidad pública, inmediata o posterior para personas, el medio ambiente o la propiedad, tanto dentro o fuera de una instalación industrial.

La mayoría de la gente sabe que cualquier actividad humana, benéfica, puede implicar un riesgo. En particular, la industria química, es claro que no importa cuanta seguridad se implemente, la actividad implica riesgo que sólo puede eliminarse completamente, eliminando la industria. Obviamente, esto es imposible pues en el mundo real la industria es necesaria; sin embargo, la cuestión es simple ¿Qué nivel de riesgo es aceptable en una instalación o proceso? o quizás más acertadamente: ¿Qué grado de riesgo puede ser aceptable cuando se compara contra el beneficio derivado de asumirlo? Esta decisión, siempre es difícil, es además complicado por una serie de factores que frecuentemente se presentan, por ejemplo, el hecho de que los riesgos no se conocen con suficiente precisión, que las personas quienes podrían ser afectadas (dentro y fuera de la planta) pueden no haber asumido voluntariamente el riesgo, que las personas en riesgo no son las principales beneficiadas de la actividad, etc. También sucede que las alternativas a una situación dada son desconocidas o impracticables, lo cual hace que la adopción de soluciones sea aún mas difícil.

El proceso de toma de decisión sobre el nivel de riesgo aceptable es complejo porque los objetivos son múltiples y, en ocasiones contradictorios. Es necesario tener en cuenta implicaciones humanas, económicas, legales y públicas.

1.2.1 CUANTIFICACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO

Si aceptamos la premisa de que es imposible eliminar completamente el riesgo, la cuestión básica es: ¿ Cuantas medidas de seguridad son suficientes? En muchos casos el nivel insuficiente de conocimiento científico del proceso en cuestión y la carencia de información disponible hace imposible contestar esta pregunta con certeza. A pesar de esto, los órganos encargados de regular la actividad industrial publican leyes y normas para la protección de la población en general. Deciden si autorizan el uso de un cierto compuesto químico o la construcción de una nueva planta, limitan el impacto ambiental, regulan la disposición de desechos, etc. La falta de certidumbre a veces ocasiona que se legisle con el fin de proteger contra circunstancias extremadamente improbables (el peor de los escenarios, escenarios poco probables). Esto puede dar como resultado una desproporcionada asignación de recursos, una disminución en la innovación tecnológica, y gastos excesivos. Al mismo tiempo es posible que situaciones que podrían ser legisladas sean ignoradas.

Para estar en posibilidad de decir si un riesgo es o no aceptable, se requiere una estimación de su magnitud, lo que implica un análisis previo. Análisis de riesgo significa cuantificación del peligro de una actividad dada que puede representar daños a personas, propiedad o medio ambiente. El análisis tiene el fin de proporcionar una estimación de la magnitud del daño potencial y la probabilidad de que este ocurra. El Análisis de Riesgo es una disciplina que combina la evaluación del proceso con simuladores para evaluar la consecuencias de un accidentes y técnicas matemáticas que permiten calcular la probable frecuencia de ocurrencia de un accidente.

Los resultados del análisis de riesgo se usan para tomar decisiones (administración de riesgo), permitiendo la comparación del nivel de riesgo estimado con aquellos fijados como objetivos para una actividad particular, y auxiliar para fijar prioridades a las estrategias de reducción de riesgos. Los principales elementos de un programa de administración de riesgos se presentan en la Tabla 1.2

El análisis de riesgos permite, dentro de los niveles de incertidumbre asociado con el método usado y la disponibilidad de información, cuantificar la posibilidad de la ocurrencia de un accidente en un proceso o instalación particular, y, cuando se considera este riesgo muy alto. Hace posible la comparación entre procedimientos para reducción de riesgos. Cada alternativa de reducción de riesgos tendrá un costo diferente, se debe tener en cuenta cuando se haga la decisión final. Como algo de nivel de riesgo debe aceptarse, el análisis de riesgos nos permite asignar prioridades a la inversión en seguridad, distribuyendo los fondos disponibles del modo más efectivo.

TABLA 1.2 ELEMENTOS DE UN PROGRAMA DE ADMINISTRACIÓN DE RIESGOS

-
- Identificación de riesgos
 - Análisis de consecuencias
 - Evaluación de riesgo
 - Capacitación a empleados
 - Modificación al control de la planta
 - Procedimientos de operación
 - Procedimientos de mantenimiento
 - Auditorias de seguridad
 - Investigación de accidentes / incidentes
 - Registros y archivos
 - Plan de emergencia
-

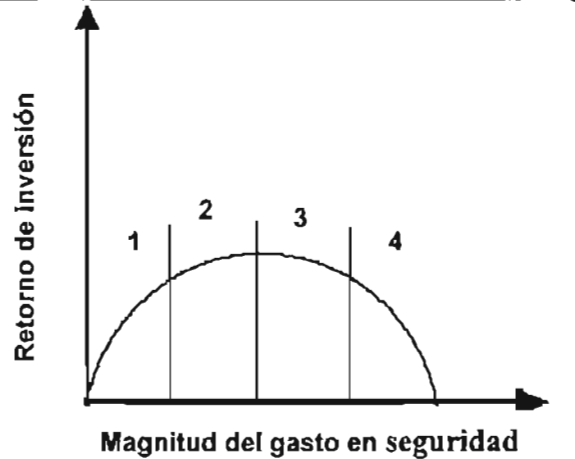
1.3 RETORNOS EN EL ANÁLISIS DE RIESGO

Los recursos económicos en cualquier actividad son limitados y, como se ha señalado, el análisis de riesgo es una herramienta valiosa cuando se toman decisiones con respecto al destino de los fondos disponibles para invertir en seguridad. Dado el costo económico que los accidentes tienen en la industria, es claro que, aun cuando no exista riesgo a la vida o salud de las personas, un cierto nivel de inversión en seguridad podría ser justificable simplemente aplicando el criterio de rentabilidad. Esto corresponde al área 1 en la figura 1.1 donde, con una pequeña inversión, beneficios significativos se obtienen, y los retornos son elevados ya que son capaces de competir ventajosamente con otras posibles inversiones. En el área 2, si bien la inversión aún es ventajosa, probablemente no sería justificable como tal, solamente en bases económicas, cuando se comparan con otras de mayor rentabilidad. A pesar de esto, la mayoría de las empresas también invierten en el área 2. Existen otras razones importantes (ética, imagen, relaciones públicas, etc), que son difíciles o imposibles de cuantificar económicamente. Estas mismas razones señalan lo conveniente de mantener la inversión en seguridad, aunque se piense que cerrar es provechoso, lo que nos coloca en el área 3. Incrementado más el nivel de inversión y entrando en el área 4 implicaría hacer más grande la desventaja con otras industrias del sector. Si los niveles de riesgo de una compañía particular son tales que el la inversión en seguridad requerida es de esta magnitud la opción usual es cesar la actividad.

Como hemos visto, el análisis de riesgos aplicado a una planta existente puede ayudar a identificar y separar las diferentes áreas que aparecen en la figura 1.1 y hacer las correspondientes decisiones. Sin embargo, su mayor potencial se obtiene al aplicarlo a plantas que aún no se construyen. La oportunidad para la implementación de seguridad intrínseca en el proceso es máxima, y con un mínimo costo, mientras el proceso se esta definiendo aún. Los posibles peligros de una instalación se identifican pronto, permitiendo cambiar la ruta de reacción, cambiar las condiciones de proceso, o el tipo de equipo a usarse de esta manera la posibilidad de un accidente se reduce, y sus posibles efectos se limitan.

Cuando no se puede implementar un proceso intrínsecamente seguro tendrá que agregarse seguridad extrínseca: controles, alarmas, equipo redundante, procedimiento de seguridad, etc. Con el consecuente incremento en inversión. Como avanzamos desde la definición del proceso al desarrollo del diseño y la etapa de construcción existen aún posibilidades para la seguridad extrínseca, pero las oportunidades para seleccionar condiciones que incrementen la seguridad intrínseca disminuyen rápidamente. Es en consecuencia esencial realizar un análisis de riesgos básico en una etapa muy temprana del diseño del proceso, el cual se volverá gradualmente mas sofisticado a medida que el proceso se define con más precisión.

FIGURA 1.1 DIAGRAMA CUALITATIVO, MUESTRA EL RETORNO DE INVERSIÓN EN SEGURIDAD¹



1.4 ETAPAS DE UN ANÁLISIS DE RIESGO

Un análisis de riesgos orientado a la prevención de accidentes generalmente implica las siguientes etapas:

1. Identificación de eventos indeseables que puedan conducir a la materialización de un peligro.
2. Analizar los mecanismos que conducen a estos eventos indeseables.
3. Estimación de las consecuencias no deseadas y la frecuencia con la cual estas pueden suceder.

Las diferentes etapas en el análisis de riesgo corresponde a las preguntas generales indicadas en la Figura 1.2. La primera pregunta ¿Qué puede salir mal? Se refiere a todas las circunstancias que podrían razonablemente elevar los efectos adversos. La naturaleza de la pregunta es puramente cualitativa, y da origen al bloque "Identificación de peligros". En esta fase del estudio una exhaustiva lista, dentro de los límites del análisis, detallando todas las desviaciones que a) podrían producir un efecto adverso significativo y b) que tenga una probabilidad razonables de ocurrencia. Con respecto a esta sección, todas las desviaciones que podrían ocurrir deben emplearse como un primer paso, aún si sus probabilidades son aparentemente pequeñas. Por esto, el juicio de ingeniería debe usarse en conjunto con la experiencia acumulada en el proceso a ser estudiado, permitiendo el rechazo, sin un tratamiento matemático formal, de desviaciones altamente improbables.

¹ Kletz, T (1992) *Hazop and Hazan . Identifying and Assessing Process Industry Hazards*, 3 edición, The Institution of Chemical Engineers, Rugby.

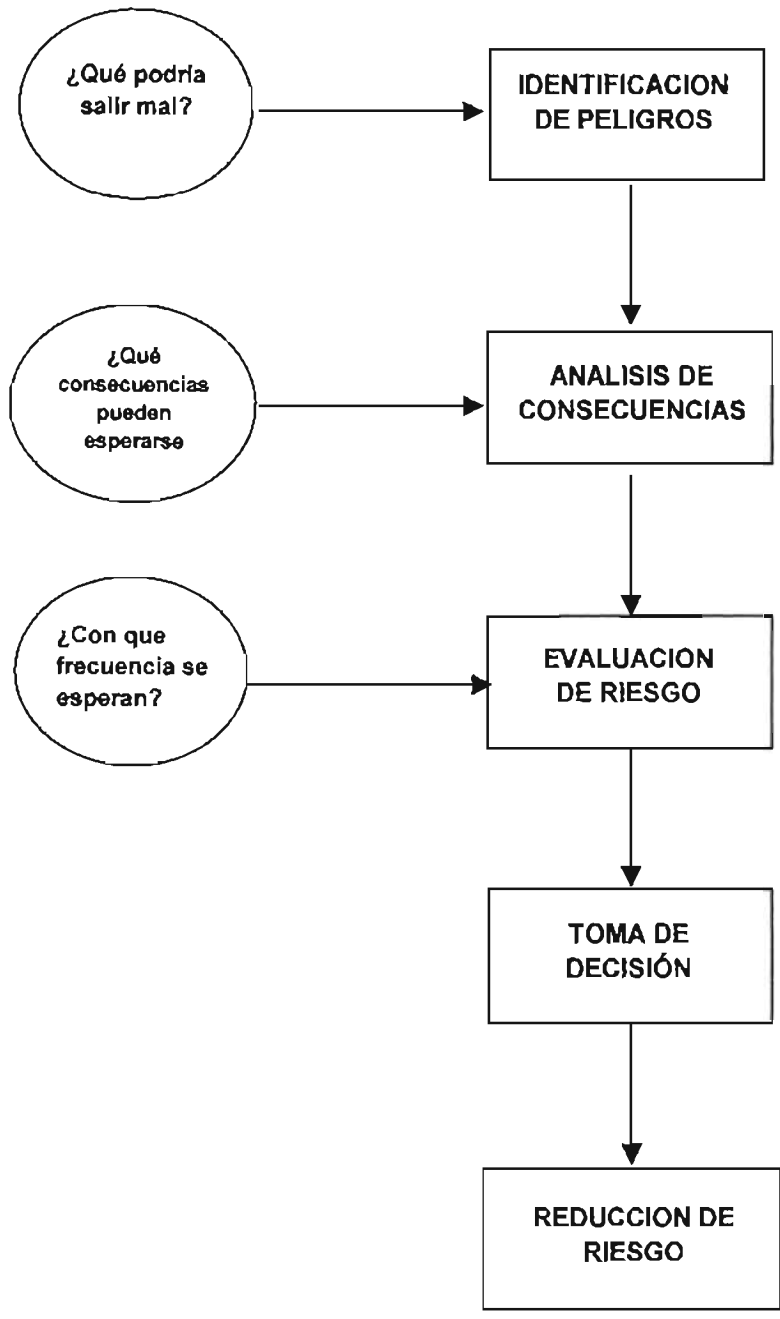


FIGURA 1.2 ETAPAS DE UN ANÁLISIS DE RIESGO

La identificación de circunstancias que podrían elevar situaciones peligrosas es crucial: un peligro no identificado es algo que no deberá considerarse. Para evitar omisiones en esta sección, la experiencia del personal directamente involucrado en el proceso se requiere, pero la industria ha desarrollado también una serie de poderosas herramientas: códigos y estándares para diseño, check list, datos específicos sobre equipos y falla componentes, índices de riesgo, análisis histórico de accidentes, análisis What If ...?, análisis HAZAPO, análisis modo de fallo y efectos (FMEA), etc.

Una vez que las circunstancias que podrían elevar razonablemente los efectos adversos de cierto riesgo se identifican, la siguiente etapa se establece con la segunda pregunta ¿Qué consecuencias pueden esperarse? Para contestarla, es necesario tener un modelo del sistema que pueda ser usado para estimar los efectos originados a partir de las causas identificadas. Existe un paso previo, en el cual la selección de modelos adecuados se realiza. Así, el mismo incidente (por ejemplo: el colapso de un recipiente con líquido inflamable bajo presión) podría tener diferentes consecuencias (explosión de una nube de vapor, flash fire, la BLEVE, formación y dispersión de nube sin ignición, etc.) Las diferentes posibilidades deben ser analizadas con el modelo apropiado, el cual en cada caso dará un estimado de las consecuencias esperadas para el personal y/o la instalación. Acciones evasivas y/o medidas de protección pueden ser incluidas en el modelo. Así modificando anticipadamente los efectos del accidente.

El objetivo de el tercer paso del análisis de riesgo es responder la pregunta : ¿Con que frecuencia se espera un evento?.Una vez que los eventos que podrían elevar los daños significativos han sido identificados, y la magnitud de sus efectos ha sido estimada, el siguiente paso requiere la cuantificación de la probabilidad de dichos eventos, como estimar su frecuencia (ocasiones por año) o la probabilidad de que un evento dado tenga lugar durante la vida productiva de una planta. El producto de la magnitud de los efectos nocivos y la probabilidad de su ocurrencia nos da una herramienta muy útil para la toma de decisiones. Estimaciones semi-cuantitativas pueden ser obtenidas de la probabilidad de un incidente a partir de un análisis histórico de accidentes. Sin embargo, no siempre existe suficiente información en las bases disponibles, debido a las dificultades inherentes a la recolección de información sobre accidentes. Esta es la razón por la cual métodos más estructurados se emplean usualmente, tal como el árbol de fallos ó el árbol de eventos, donde las probabilidades se asignan a cada etapa en la secuencia de eventos considerados. Esto se hace usando la información sobre frecuencia de fallo de equipos y componentes que esta disponible en las bases de datos de fiabilidad de equipos.

Las diferentes etapas de un análisis de riesgo para evaluar el diseño de una planta se muestran en la figura 1.3 Es importante reconocer que no todas las técnicas requeridas se han desarrollado en el mismo nivel. Así, puede decirse que las técnicas de identificación de peligros han alcanzado madurez y pueden ser empleadas con confianza, es decir que si aplican correctamente, la identificación de todos los riesgos relevantes deben obtenerse. También puede considerarse que las técnicas de estimación de consecuencias están bien desarrolladas, lo que significa, dado un escenario, la incertidumbre con respecto a los efectos producidos son relativamente pequeños. Y su magnitud puede ser estimada aproximadamente. Contrario a esta, estimar la frecuencia esta comparativamente menos desarrollada, y requerirá desarrollo significativo hasta que su incertidumbre disminuya a niveles comparables a aquellos de las técnicas previamente mencionadas. Sin embargo, la cantidad de información disponible en bases de datos de fallos y accidentes esta constantemente incrementándose, lo que significa que eventualmente la mayoría de frecuencias y probabilidades de fallos serán estimadas con buena aproximación. Debe notarse que no todo los datos entrados tienen el mismo peso cuando estimamos las frecuencias de accidentes. Por el contrario, a veces solo algunas frecuencias del árbol de fallos son críticas para la precisión del resultado final.

Aunque no se considera en la figura 1.3, una de las tareas a ser realizadas en una de las etapas tempranas del proceso del análisis de riesgo consiste en desarrollar un conjunto específico de datos para el análisis. Aparte de la información contenida en el bloque “descripción del sistema” conocimiento de factores externos se requiere (topografía y el uso del suelo en los alrededores, información demográfica, información meteorológica, servicios externos, etc.) Además de datos relevantes para la estimación de la probabilidad de incidentes (record de accidentes pasados, datos de fiabilidad de los equipos, datos de catástrofes naturales, etc.)

Parte de la información requerida puede obtenerse de bases de datos públicas, aunque normalmente el analista puede compilar esta información de su experiencia y de la información interna de la compañía.

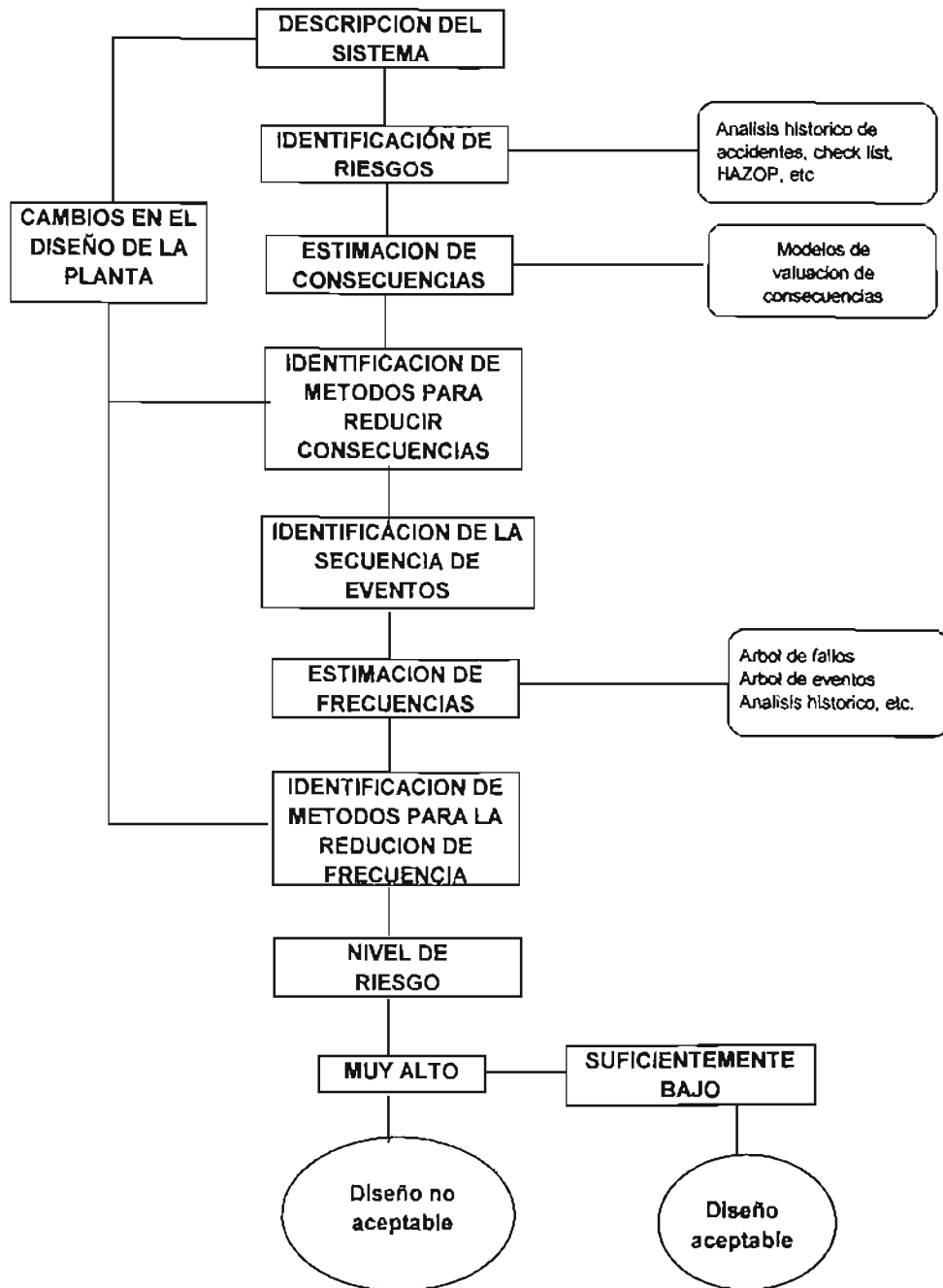


FIGURA 1.3 VALUACION DEL DISEÑO DE UNA PLANTA USANDO METODOS CUANTITATIVOS DE ANÁLISIS DE RIESGO²

² CCPS (Center for Chemical Process Safety) (1989) *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York.

1.4.1 TOMA DE DECISIONES EN MATERIA DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

Como se indicó antes, cuando una actividad implica un nivel de riesgo, puede aceptarse o puede hacerse un esfuerzo por reducirlo. En cualquier caso, la decisión involucra estimar la probabilidad de la magnitud del riesgo y sus consecuencias, también el costo de las posibles medidas correctivas. Algunos de los aspectos en los que el análisis de riesgo puede usarse específicamente se muestran en la figura 1.4. El análisis de riesgo involucra la identificación de las posibles causas de un accidente y los mecanismos que conducen a él, valorar sus consecuencias y estimar la probabilidad de que este tenga lugar. Una vez que la información para los distintos escenarios del accidente considerado, esta disponible, una jerarquización del riesgo puede ser establecida, lo que conduce a una lista de prioridades de reducción de riesgo. En los casos donde la reducción de riesgo se considera necesaria, generalmente existe más de un procedimiento para alcanzar el nivel de riesgo deseado. Nuevamente, el análisis de riesgo es la herramienta que ayuda a decidir entre las opciones existentes, eligiendo cual proporciona más efectiva reducción de riesgo.

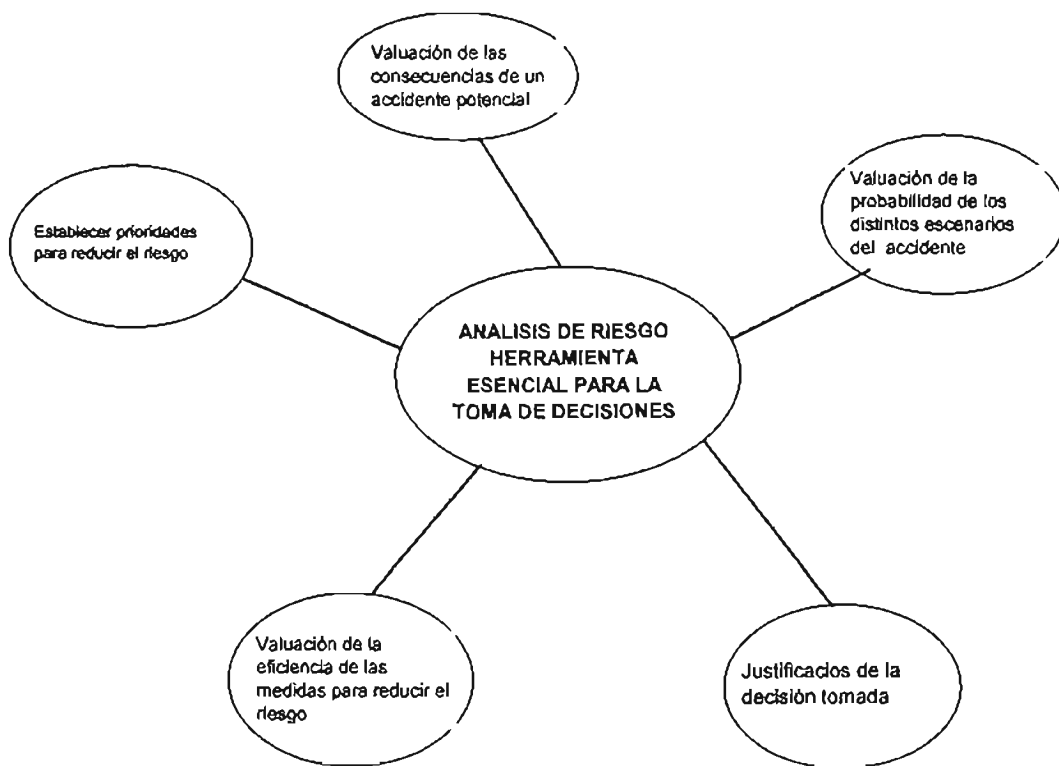


FIGURA 1.4 USO DEL ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA TOMA DE DECISIONES

2. ANALISIS DE RIESGO EN MEXICO

La Evaluación del Riesgo Ambiental (ERA), concebida como un instrumento de la política ambiental, analítico y de alcance preventivo, permite integrar al ambiente un proyecto o una actividad determinada; en esta concepción el procedimiento ofrece un conjunto de ventajas para proteger al ambiente, invariablemente, esas ventajas sólo son apreciables después de largos periodos de tiempo y se concretan en las inversiones y los costos de las obras, en diseños más completos e integrados al ambiente y en una mayor aceptación social de las iniciativas de inversión.

A nivel nacional los primeros intentos por evaluar el Riesgo Ambiental surge en 1983, año en el que la Ley Federal de Protección al Ambiente introduce por primera vez los Estudios de Riesgo Ambiental, como parte del procedimiento de Evaluación del Impacto Ambiental de los proyectos industriales. En tanto que la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en 1988 y sus modificaciones publicadas en 1996 y 2001, amplían el concepto para incorporar la obligación por parte de las Actividades Altamente Riesgosas que se proyecten, de elaborar e instrumentar programar para la prevención de accidentes que incluyan planes externos para la respuesta a emergencias.

Si bien muchas cosas han cambiado y junto con ellas las ideas y los conceptos vinculados a este instrumento, la mayoría de sus bases siguen siendo válidas, Así en el contexto internacional, hay numerosas aportaciones cuantitativas y conceptuales que enriquecen la visión tradicional que ha tenido el procedimiento de Evaluación del Riesgo Ambiental.

Actualmente, en muchos países, la Evaluación del Riesgo Ambiental es considerada como parte importante de las tareas de planeación: superando la concepción obsoleta que le asignó un papel posterior o casi último en el procedimiento de gestión de un proyecto, que se cumplía como un simple trámite tendente a cumplir las exigencias administrativas de la autoridad ambiental después de que se habían tomado las decisiones clave de la actividad o del proyecto que pretendía llevarse a la práctica. En el lapso transcurrido entre 1992 y 1999, se han logrado importantes avances con respecto al seguimiento del cumplimiento de las recomendaciones derivadas de los Estudios de Riesgo Ambiental.

2.1 MARCO LEGAL

El fundamento legal y técnico básico que se emplea está contenido en el Título Cuarto Protección al Ambiente, del Capítulo V Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, principalmente en los siguientes artículos:

Artículo 145.- La Secretaría promoverá que en la determinación de los usos de suelo se especifiquen las zonas en las que se permite el establecimiento de industrias, comercios o servicios considerados riesgosos por la gravedad de los efectos que puedan generar en los ecosistemas o en el ambiente, tomándose en consideración:

- I. Las condiciones topográficas, meteorológicas, climatológicas, geológicas y sísmicas de las zonas;
- II. Su proximidad a centros de población, previniendo las tendencias de expansión del respectivo asentamiento y la creación de nuevos asentamientos;
- III. Los impactos que tendría un posible evento extraordinario de la industria, comercio o servicio de que se trate;
- IV. La compatibilidad con otras actividades de las zonas;
- V. La infraestructura existente y necesaria para la atención de emergencias ecológicas, y
- VI. La infraestructura para la dotación de servicios básicos.

Artículo 146.- La Secretaría, previa opinión de las Secretarías de Energía, de Economía, de Salud, de Gobernación y del Trabajo y Previsión Social, conforme al Reglamento que para tal efecto se expida, establecerá la clasificación de las actividades que deban considerarse altamente riesgosas en virtud de las características, corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico – infecciosas para el equilibrio ecológico o el ambiente, de los materiales que se generen o manejen en los establecimientos Industriales, comerciales o de servicios, considerando, además, los volúmenes de manejo y la ubicación del establecimiento.

Derivado de ello, el 28 de marzo de 1990 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas, enfocado a sustancias tóxicas. De igual manera el 4 de mayo de 1992 se publicó en el DOF el Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas enfocado a sustancias inflamables y explosivas.

Artículo 147.- La realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior. Quienes realicen actividades altamente riesgosas, en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría de Gobernación, de Energía, de Economía, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos.

Adicionalmente fortalece este fundamento el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental, con los siguientes artículos:

Artículo 17.- El promovente deberá presentar a la Secretaría la solicitud de autorización en materia de Impacto Ambiental, anexando:

- I. La Manifestación de Impacto Ambiental.
- II. Un resumen del contenido de la Manifestación de Ambiental, presentando en disquete, y
- III. Una copia sellada de la constancia del pago de derechos correspondientes.

Cuando se trate de Actividades Altamente Riesgosas en los Términos de la Ley, deberá incluirse un Estudio de Riesgo.

Artículo 18.- El Estudio de Riesgo a que se refiere el Artículo anterior, consistirá en incorporar a la Manifestación de Impacto Ambiental la siguiente información:

- I. Escenarios y medidas preventivas resultantes del análisis de los riesgos ambientales relacionados con el proyecto;
- II. Descripción de las zonas de protección en torno a las instalaciones, en su caso, y
- III. Señalamiento de las medidas de seguridad en materia ambiental.

La Secretaría publicará, en el Diario Oficial de la Federación y en la Gaceta Ecológica, las guías que faciliten la presentación y entrega del Estudio de Riesgos.

2.2 LA EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL. CONCEPTOS BÁSICOS

La evaluación del Riesgo Ambiental es un instrumento de carácter preventivo mediante la aplicación sistemática de políticas, procedimientos y prácticas de manejo a las tareas de análisis, evaluación y control de riesgos con el fin de proteger a la sociedad y al ambiente anticipando la posibilidad de liberaciones accidentales de sustancias consideradas como peligrosas por sus características CRETIB en las instalaciones y evalúa su impacto potencial, de manera tal que éste pueda prevenirse o mitigarse requiriendo como mínimo:

- Reconocimiento de posibles riesgos.
- Evaluación de posibles eventos peligrosos y la mitigación de sus consecuencias.
- Determinación de medidas apropiadas para la reducción de estos riesgos.

Con lo anterior el estudio debe permitir establecer propuestas de acciones de protección al ambiente y de prevención de accidentes que pudieran producirse.

Los Estudios de Riesgo no tan sólo deben comprender la evaluación de la probabilidad de que ocurran accidentes que involucren a los materiales peligrosos, sino también la determinación de las medidas para prevenirlos, así como un plan de emergencias interno.

El objetivo inmediato de la Evaluación del Riesgo Ambiental es servir de ayuda en la toma de decisiones. Para ello sus resultados habrán de presentarse con un orden lógico, de forma objetiva y fácilmente comprensible, de manera tal que los evaluadores que analicen el documento, encargados de sustentar la decisión de la autoridad, determinen la conveniencia, o no, de que el proyecto estudiado, sea autorizado. Además de identificar, prevenir e interpretar los efectos que un proyecto puede tener en la sociedad y el ambiente.

El objetivo Fundamental de la Evaluación del Riesgo Ambiental, es definir y proponer la adopción de un conjunto de medidas preventivas que permitan o incluso evitar los riesgos a la sociedad y el ambiente.

Un estudio de riesgo está compuesto por dos partes; aquella en donde se emplean una serie de metodologías de tipo cualitativo y cuantitativo para identificar y jerarquizar riesgos; y la otra parte conocida como análisis de consecuencias. En síntesis, este proceso multidisciplinario debe constituir la etapa previa (con bases científicas, técnicas, socioculturales, económicas y jurídicas), a la toma de decisiones acerca de la puesta en operación de un proyecto determinado.

2.3 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

La elaboración de un Estudio de Riesgo Ambiental, en términos generales se constituye por un conjunto de documentos e información, que genéricamente se concretan en los siguientes rubros:

Información requerida en datos generales

Datos del promovente, documentación legal, así como información del responsable de la elaboración del estudio de riesgo.

Información aplicable a los cuatro niveles de estudios de riesgo

Descripción general de las actividades del proyecto.- Referencia de la ubicación de la actividad productiva proyectada y la superficie que ocupará, entre otras cosas:

Aspectos del medio natural y socioeconómico.- Descripción detallada del entorno ambiental que rodea a la actividad que se pretende evaluar, lo cual permite determinar la vulnerabilidad de la zona, en caso de presentarse algún accidente en las instalaciones o de presentarse fenómenos naturales que afecten dicha actividad.

Integración del proyecto.- Señalar si las actividades de la instalación se encuentran enmarcadas en las políticas del Programa de Desarrollo Urbano, que tenga vinculación directa con las mismas.

Conclusiones y recomendaciones.- Resumen de la situación general que presenta el proyecto en materia de riesgo ambiental, señalando las desviaciones encontradas y áreas de afectación; asimismo, se incluyen recomendaciones para corregir, mitigar o reducir los riesgos identificados.

Anexo fotográfico.- Presentar anexo fotográfico o vídeo del sitio de pretendida ubicación de la instalación, en el que se muestren las colindancias y puntos de interés cercanos al mismo. Así como de las instalaciones, áreas o equipos críticos.

Nivel 0 Ductos terrestres

Aplicar para cualquier proyecto que maneje sustancias consideradas como peligrosas en virtud de sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas o inflamables a través de ductos que presenten alguna de las siguientes características :

- a) Longitud igual o mayor de un kilómetro; diámetro nominal igual o mayor de 10.16 cm; y presión de operación igual o mayor de 10 kg/cm² antes de la caseta de regulación. En virtud de que el riesgo ambiental inherente de un ducto se incrementa proporcionalmente a la longitud, diámetro nominal, y presión de operación del mismo.
- b) En su trayectoria cruza con zonas habitacionales o áreas protegidas.
- c) Independientemente de las condiciones anteriores, el ducto que transportará ácido fluorhídrico, cloruro de hidrógeno, ácido cianhídrico, cloro, amoníaco, óxido de etileno, butadieno, cloruro de etileno o propileno.

Nivel 1 Informe preliminar de riesgo

Aplica para cualquier proyecto en el que se pretenda almacenar, filtrar o mezclar alguna sustancia considerada como peligrosas en virtud de sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicas – infecciosas, en cantidad igual o mayor a la establecida en el Primer o Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas publicado en el DOF; a presión atmosférica y temperatura ambiente, en sitios donde el uso de suelo sea exclusivamente agrícola, industrial o rural sin uso.

Nivel 2 Análisis de riesgo

Aplica para cualquier proyecto en el que se maneje alguna sustancia en cantidad mayor a la establecida en el Primer o Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas publicados en el DOF; que presente hasta cuatro de las características siguientes:

- a) El tipo de operación que se realiza es: destilación, refrigeración, y/o extracción con solventes o absorción,

- b) El almacenamiento se realiza en tanques presurizados.
- c) Existe reacción química, intercambio de calor y/o energía, presiones diferentes a la atmosféricas o temperaturas diferentes a la ambiental.
- d) Se pretenda ubicar en zona de reserva ecológica o donde el uso del suelo sea habitacional o mixto.
- e) La zona donde se pretende ubicar sea susceptible a sismos, hundimientos o fenómenos hidrológicos y meteorológicos adversos.

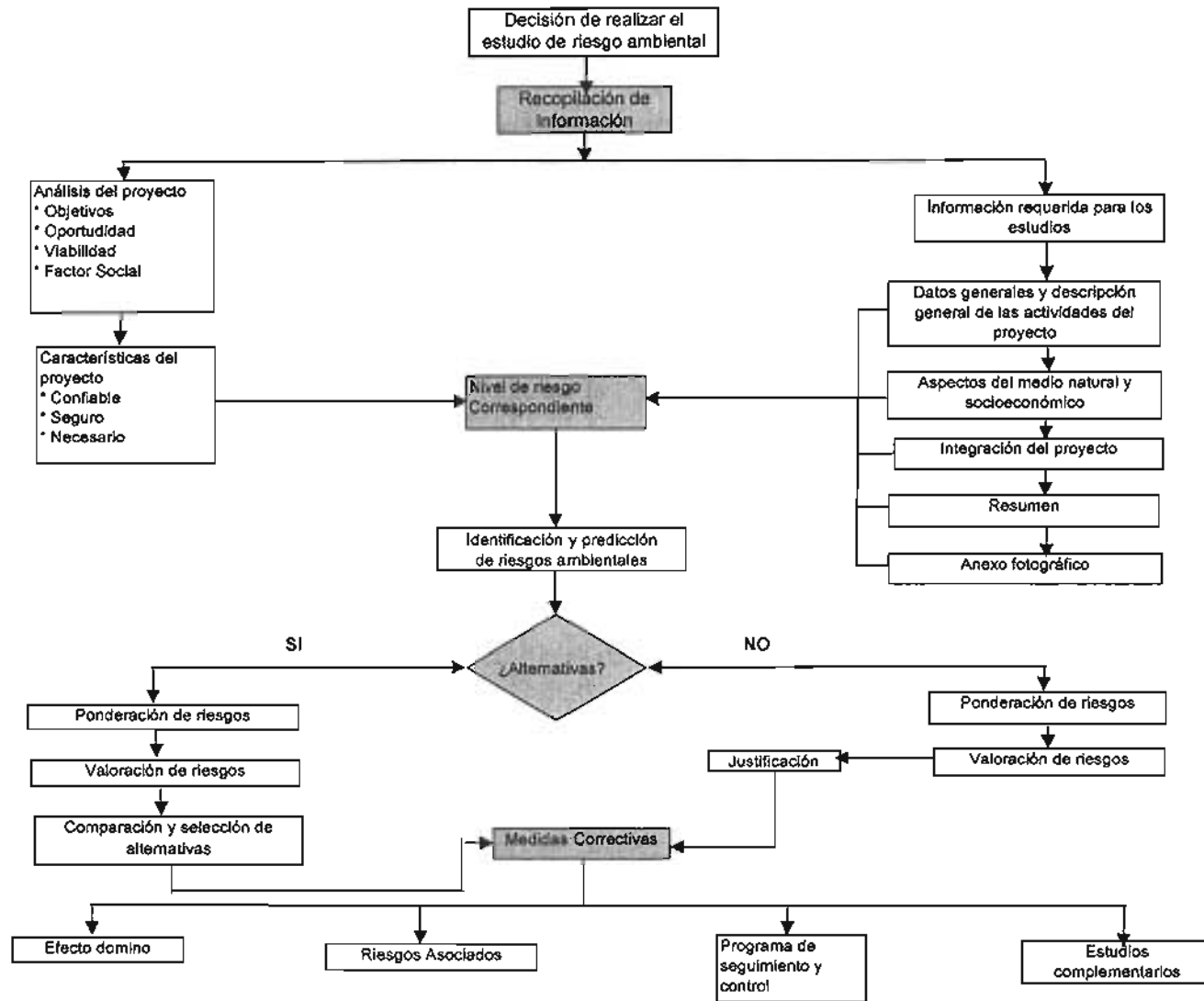
Nivel 3 Análisis detallado de riesgo

Aplica para cualquier proyecto en el que maneje alguna sustancia en cantidad mayor a la establecida en el Primer o Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas Publicadas en el DOF; que presente todas las características siguientes:

- a) El tipo de operación que se realiza es: destilación , refrigeración o extracción de solventes o absorción.
- b) El almacenamiento se realiza en tanques presurizados.
- c) Existe reacción química, intercambio de calor y/o energía, presiones a diferentes a la atmosférica o temperaturas diferentes a la ambiental.
- d) Se pretenda ubicar en zona de reserva ecológica o donde el uso del suelo sea habitacional o mixto.
- e) La zona donde se pretende ubicar sea susceptible a sismos, hundimientos o fenómenos hidrológicos y meteorológicos adversos.

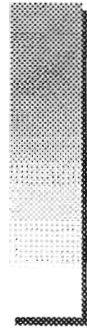
De lo contrario, con alguna de las características siguientes:

- a) Se trata de complejos químicos o petroquímicos con dos o más plantas.
- b) En algunas de las etapas del proceso de producción se genere alguna sustancia o producto caracterizado por su alta toxicidad y/o efecto residual, acumulativo y letal para el ser humano y la biota del sitio.
- c) Cuando se trata de una actividad que esta interconectada con otra actividad altamente riesgosa ubicada en predio colindante, a través de tuberías en las que se maneje algunos de los materiales reportados en los Listados de Actividades Altamente Riesgosas.



FLUJOGRAMA DE REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

PRIMERA PARTE
METODOS CUANTITATIVOS PARA EL
ANÁLISIS DE RIESGO



1. METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FRECUENCIAS .

En un análisis cuantitativo de riesgos existe la necesidad de cuantificar la frecuencia o probabilidad de una serie de sucesos, en el sentido más amplio del término. Básicamente, se puede considerar la necesidad de cuantificación de los siguientes sucesos:

Iniciadores: En esta categoría se incluyen sucesos externos, fallos de operación, humanos o pérdidas de inventario. Estos sucesos tienen una determinada frecuencia de ocurrencia en el tiempo, generalmente expresada en ocasiones por año.

Los sucesos que condicionan la evolución de un suceso iniciador: En esta categoría se incluyen indisponibilidades de sistemas de seguridad, fenómenos físicos (ignición, explosión, etc). Estos sucesos se caracterizan por su probabilidad de ocurrencia.

Se considera *Suceso Básico* a un evento simple cuya frecuencia/probabilidad se puede determinar de forma directa.

Se distingue de los Sucesos Complejos para los cuales la obtención de la frecuencia/probabilidad no es inmediata.

En este capítulo se describen en primer lugar las bases matemáticas de la teoría de probabilidades y estadística; a continuación se presentan los métodos de obtención de las frecuencias/probabilidades de los sucesos simples; y, por último, se describen los métodos a utilizar para calcular sucesos complejos.

1.1 BASES MATEMÁTICAS

La determinación cuantitativa de las frecuencias de los accidentes se basa en la teoría matemática de las probabilidades de la cual se hace una breve exposición.

1.1.1 TEORÍA DE PROBABILIDADES

Se define un *experimento aleatorio* como cualquier proceso de observaciones cuyos resultados son no determinísticos, es decir, que existe más de una posibilidad de resultados. Es el típico caso del lanzamiento de un dado.

La totalidad de los resultados posibles de un experimento recibe el nombre de *espacio muestral*. Los resultados de un experimento se pueden considerar como elemento del espacio muestral que puede ser discreto (número finito o infinito numerable de elementos) o continuos.

Se denomina *suceso* al resultado o conjunto de resultados de un experimento que, por lo tanto, puede definirse como un subconjunto determinado de un espacio muestral.

La teoría de conjuntos permite llevar a cabo una serie de combinaciones sobre los conjuntos a través de tres operaciones: la *unión* (\cup), la *intersección* (\cap) y la *complementariedad* (\bar{A} , notación de complementario de un conjunto A) de conjuntos.

Se pueden definir los siguientes tipos de sucesos:

Suceso cierto: es aquel que ocurre siempre. El subconjunto asociado es el espacio muestral entero.

Suceso imposible: es aquel que nunca se produce como consecuencia de un experimento. El subconjunto asociado es el conjunto vacío.

Sucesos idénticos: son sucesos que se producen o no simultáneamente para cada observación del experimento.

Suceso complementario: (\bar{A} o contrario de un suceso determinado, es el que ocurre siempre y cuando no ocurra el suceso y viceversa.

Sucesos incompatibles: mutuamente independientes o también excluyentes, son sucesos que no pueden ocurrir al mismo tiempo.

Sucesos dependientes: o condicionados (A/B), es el suceso (A) cuya ocurrencia viene condicionada por la ocurrencia de otro suceso (B).

Se dice que S, un subconjunto de sucesos del espacio muestral, tiene una estructura de álgebra de Boole con respecto de las operaciones de unión, intersección y complementariedad, cuando el espacio muestral es finito.

Las propiedades que caracterizan un álgebra de Boole son las reseñadas en la tabla 1.1, donde se indican también las representación de los diagramas de Venn.

TABLA 1.1 / I PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

Notación matemática	Notación técnica	Nombre
(1a) $X \cap Y = Y \cap X$	$X \cdot Y = Y \cdot X$	Ley Conmutativa
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$	$X + Y = Y + X$	
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$	$X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$	Ley asociativa
(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$	
(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	$X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$	Ley Distributiva
(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$	$X + (Y \cdot Z) = (X + Y) \cdot (X + Z)$	
(4a) $X \cap X = X$	$X \cdot X = X$	Ley de Impotencia
(4b) $X \cup X = X$	$X + X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	$X \cdot (X + Y) = X$	Ley de Absorción
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	$X + X \cdot Y = X$	
(6a) $X \cap \bar{X} = \emptyset$	$X \cdot \bar{X} = \emptyset$	Complementariedad
(6b) $X \cup \bar{X} = \Omega = 1$	$X + \bar{X} = \Omega = 1$	
(6c) $\overline{(\bar{X})} = X$	$\overline{(\bar{X})} = X$	
(7a) $\overline{(X \cap Y)} = \bar{X} \cup \bar{Y}$	$\overline{(X \cdot Y)} = \bar{X} + \bar{Y}$	Teorema de Morgan
(7b) $\overline{(X \cup Y)} = \bar{X} \cap \bar{Y}$	$\overline{(X + Y)} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$	
(8a) $\emptyset \cap X = \emptyset$	$\emptyset \cdot X = \emptyset$	Operaciones con \emptyset y Ω
(8b) $\emptyset \cup X = X$	$\emptyset + X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = X$	$\Omega \cdot X = X$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	$\Omega + X = \Omega$	
(8e) $\emptyset = \Omega$	$\emptyset = \Omega$	
(8f) $\Omega = \emptyset$	$\Omega = \emptyset$	
(9a) $X \cup (X \cap Y) = X \cup Y$	$X + (X \cdot Y) = X + Y$	Estas referencias no tienen nombre pero son frecuentemente utilizadas en los procesos de reducción
(9b) $(X \cap X \cup Y) = (X \cap Y) \cup (X \cup Y)$	$(X \cdot (X + Y)) = (X \cdot Y) + (X + Y)$	

* Ω : Espacio muestral. En notación técnica, se substituye a menudo por 1 y \emptyset por 0.

\emptyset : Conjunto vacío

TABLA 1.1 / II PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE


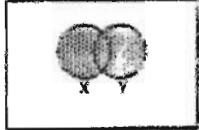
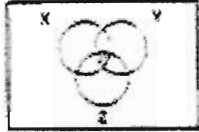
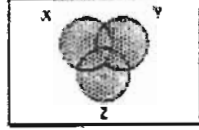


NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VENN
(1a) $X \cap Y = Y \cap X$	
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$	
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$	
(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	
(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	
(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$	

TABLA 1.1 / II PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE CONTINUA

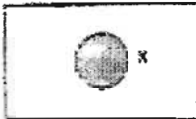
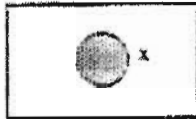
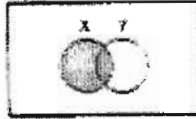
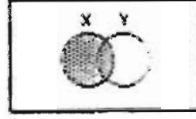
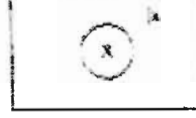

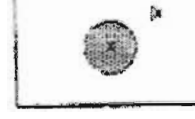

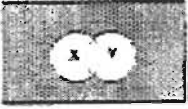


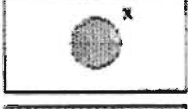



NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VEYN
(4a) $X \cap X = X$	
(4b) $X \cup X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	
(6a) $X \cap [X = \emptyset]$	
(6b) $X \cup [X = \Omega - I^*]$	
(6c) $[(X) - X]$	

TABLA 1.1 / II PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE CONTINUA

NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VENN
(7a) $(X \cap Y) = (X \cup Y)$	
(7b) $(X \cup Y) = (X \cap Y)$	
(8a) $\emptyset \cap X = \emptyset$	
(8b) $\emptyset \cup X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = X$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	
(8e) $\{\emptyset = \Omega$	
(8f) $\{\Omega = \emptyset$	

Se considera que una álgebra de sucesos es una sigma – álgebra cuando el espacio muestral es además contable.

DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN PROBABILIDAD.

En un experimento aleatorio se pueden obtener una serie de resultados: A, B,... Z. Se repite N veces el experimento y se obtiene n veces el resultado A. La frecuencia relativa del suceso «obtención de A» es n/N.

Se define la probabilidad de obtención del resultado A como:

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}$$

Dado un espacio muestral finito Ω y un suceso A de Ω , se define la probabilidad de A, $P(A)$, como el valor de la función de probabilidad P que cumple los siguientes axiomas:

1. Para cualquier suceso A de Ω , $0 \leq P(A) \leq 1$
2. $P(\Omega) = 1$
3. Si A y B son sucesos mutuamente excluyentes de Ω , $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Como consecuencia de esta definición se cumplen las siguientes propiedades:

Si $P(A) = 1$, A es el suceso cierto.

Si $P(A) = 0$, A es el suceso imposible.

Si $\bar{A} = 1 - P(A)$

Siendo \bar{A} el suceso complementario de A, tal como se dijo anteriormente

Los teoremas fundamentales de la función de probabilidad son los siguientes:

Teorema de las posibilidades totales o Poincaré

Permite calcular la probabilidad de la unión de N sucesos A_i .

$$P(\cup_{i=1}^N A_i) = \sum_1^N P(A_i) - \sum_{i,j \neq j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i,j,k \neq j \neq k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) + \dots + \dots + (-1)^{N+1} P(A_1) \dots P(A_N)$$

donde, A_i es uno de los N sucesos considerados y $p(A_i)$ su probabilidad. El primer sumando representa la suma de las probabilidades de los sucesos considerados y los restantes términos la resta / suma de las intersecciones de dos a dos, tres a tres, etc., de los sucesos.

En el caso particular de dos sucesos, la expresión se simplifica a :

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

Teorema de las posibilidades compuestas

Este teorema permite calcular la probabilidad de sucesos condicionados. Cualquiera que sean los sucesos A y B del espacio muestral:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) \text{ si } P(A) \neq 0 \quad (1)$$

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A/B) \text{ si } P(B) \neq 0 \quad (2)$$

Donde $p(A/B)$ representa la probabilidad de que, habiendo ocurrido el suceso B, se produzca el suceso A

En el caso particular de sucesos independientes se verifica:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

Teorema de Bayes

Este teorema amplía el anterior proporcionando una expresión más general que permite calcular la probabilidad de que ocurra un determinado suceso A_i (entre sucesos excluyentes que define un espacio muestral), condicionado por la ocurrencia de un suceso B , que ocurre siempre y cuando se produce al menos uno de estos sucesos A_i .

Este teorema también se denomina el teorema de la posibilidad de las causas, porque conocidas las probabilidades $p(A_i)$ —o probabilidades a priori—, se permite calcular las probabilidades $p(A_i/B)$ o probabilidades a posteriori.

Para cualquier conjunto de n sucesos mutuamente excluyentes A_i que define el espacio muestral, se cumple:

$$\sum_{i=1}^n p(A_i) = 1$$

La probabilidad de que se produzca B es:

$$p(B) = p(A_1 \cap B) + p(A_2 \cap B) + \dots$$

aplicando el teorema de las probabilidades compuestas:

$$p(B) = p(A_1) \cdot p(B/A_1) + p(A_2) \cdot p(B/A_2) + \dots$$

Es decir:

$$p(B) = \sum_{i=1}^n p(A_i) p(B/A_i) \quad (3)$$

Por otra parte, partiendo del teorema citado e igualando los dos términos de la derecha de las expresiones (1) y (2):

$$p(A_i) \cdot p(B/A_i) = p(B) \cdot p(A_i/B)$$

De donde:

$$p(A_i/B) = \frac{p(B/A_i) \cdot p(A_i)}{p(B)}$$

Sustituyendo $p(B)$ por el valor obtenido en (3) se obtiene la probabilidad de que ocurra uno de los sucesos excluyentes A_i , dado que se ha producido el suceso B es:

Sustituyendo $p(B)$ por el valor obtenido en (3) se obtiene la probabilidad de que ocurra uno de los sucesos excluyentes A_i , dado que se ha producido el suceso B es:

$$p(A_i/B) = p(B/A_i) \cdot p(A_i) / \sum_{i=1}^n p(A_i) p(B/A_i)$$

Esta expresión deducida para el caso descrito, tiene su equivalente para funciones de distribución continuas. Bajo esta forma, este teorema encuentra una de sus aplicaciones en el caso de los bancos de datos de fiabilidad.

Partiendo de una distribución estadística a priori genérica para la fiabilidad de un determinado tipo de componente, se puede obtener su distribución estadística a posteriori, teniendo en cuenta los resultados de unas pocas pruebas sobre una muestra de componentes específicos. Como ejemplos de esta aplicación se podría citar:

- Para calcular la distribución correspondiente a la fiabilidad de un componente de diseño nuevo se puede partir de la distribución correspondiente a los componentes de diseño más antiguo (distribución a priori) y se contrasta con los resultados obtenidos sobre una muestra reducida de componentes de nuevo diseño. La distribución a posteriori es una modificación de la distribución ya existente que toma en cuenta las evidencias observadas sobre la muestra.
- Para generar un banco de fiabilidad de componentes en una instalación en la cual por distintos motivos existen muy pocos datos de fiabilidad disponibles (planta con poca experiencia operativa, por ejemplo), se puede partir de los datos de un banco genérico (resumen de datos de fuentes dispersas) y obtener, alterando las distribuciones sobre la base de los pocos datos disponibles, unas distribuciones más próximas a la realidad de la instalación.

1.1.2 ESTADÍSTICA

En la mayoría de los casos, en un experimento aleatorio interesa además del resultado, una descripción numérica determinada (por ejemplo probabilidad de que el número de fallos en un ensayo sea uno, dos, etc.)

Se define como *variable aleatoria* a una función X que asocia valores numéricos a elementos del espacio muestral.

Se define la función de probabilidad (también denominada función de densidad o ley de probabilidad) de la variable aleatoria a la función $f(x)$ que asocia a cada valor de la variable aleatoria la probabilidad de que la variable tome este valor.

Una *variable aleatoria discreta* se puede representar como:

$$\phi(x_i) = P \{X = x_i\}$$

donde x_1, \dots, x_n , son los n posibles valores discretos de la variable aleatoria X (pudiendo ser n infinito; P es la función de probabilidad y f la ley de probabilidad. Como consecuencia de la definición de probabilidad se cumple:

$$\sum_{i=1}^n f(x_i) = 1$$

$f(x) \geq 0$ para cualquier x

Para una *variable aleatoria continua* se extiende la expresión anterior a:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot dx = 1$$

Se define a la *función de distribución de la variable aleatoria* (también denominada función de densidad acumulada) a la función $F(x)$:

$$F(x_n) = P \{X \leq x_n\}$$

De forma que la probabilidad de que X sea inferior o igual a x_n es:

$$F(x_{n'}) = \sum_{i=1}^{n'} f(x_i)$$

(variable aleatoria discreta)

$$= \int_{-\infty}^{x_{n'}} f(x) \cdot dx = 1$$

(variable aleatoria continua)

$F(x)$ es una función monótona creciente, varía entre $[0,1]$ y será discreta o continua según la variable aleatoria.

Los parámetros más importantes de una variable aleatoria se expresan en función de la ley de densidad de la siguiente forma.

Media o esperanza matemática: es la ponderación de los distintos valores posibles en función de sus densidades correspondientes.

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i)$$

(variable aleatoria discreta)

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$$

(variable aleatoria continua)

Varianza: es la medida de la dispersión de los valores con respecto de la media.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 f(x_i) \quad \text{v. a. discreta}$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad \text{v. a. continua}$$

Mediana: es el valor x_m de la variable aleatoria X para el cual la probabilidad de obtener un valor inferior es $1/2$.

$$\sum_{k=m}^n f(x_k) = \sum_{k=1}^m f(x_k) = 1/2 \quad \text{v. a. discreta}$$

$$\int_{-\infty}^{x_m} f(x) dx = \int_{x_m}^{+\infty} f(x) dx = 1/2 \quad \text{v. a. continua}$$

1.2 FIABILIDAD: CONCEPTOS BÁSICOS

1.2.1 FIABILIDAD / DISPONIBILIDAD DE DISTINTOS TIPOS DE COMPONENTES

Se puede definir un sistema como una entidad determinística que comprende un conjunto discreto de elementos que interaccionan.

Se denomina componente a cualquier elemento de un sistema.

La definición más ampliamente admitida de la *fiabilidad de un componente* es: "probabilidad de que desempeñe la función para la cual ha sido diseñado bajo unas condiciones determinadas y durante un espacio de tiempo especificado". En esta definición se desprenden cuatro conceptos importantes:

3. La importancia de las condiciones de trabajo del componente.

4. La definición de la función del componente que implícitamente conduce a la noción de fallo o modo de fallo.
5. La dependencia respecto del tiempo.
6. Tal como se define es una probabilidad y, por tanto, es un valor comprendido entre [0,1].

Fallo de un componente: puede abarcar desde la pérdida de prestaciones o no funcionamiento a pleno rendimiento, hasta una interrupción completa de la misión a realizar (fallo catastrófico).

Modo de fallo: se puede definir como la modalidad mediante la cual el componente deja de funcionar. Va estrechamente unido a la causa que produce el fallo o al modelo matemático utilizado para representarlo. Ejemplo: no apertura de una válvula de seguridad o apertura intempestiva.

La expresión matemática general de la fiabilidad $R(t)$ de un componente que está operando, es:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (0)$$

donde t es el tiempo de operación considerado y $\lambda(t)$ es la tasa de fallo del componente. Esta expresión se deduce del siguiente desarrollo.

Se define en primer lugar la variable aleatoria z como: "instante en que se produce el fallo de un sistema".

La función de distribución $F(t)$ de esta variable aleatoria se define, entonces, como la probabilidad de que el sistema falle entre el instante $t=0$ y t . Se supone que el sistema está operativo en el instante $t=0$

$$F(t) = P \{z \leq t\}$$

$F(t)$: función de distribución de la variable aleatoria Z .

Z : instante del fallo.

T : tiempo.

$P\{ \}$: probabilidad.

La probabilidad complementaria de $F(t)$ o probabilidad de que el sistema sobreviva a un tiempo t se define como la fiabilidad del sistema $R(t)$:

$$R(t) = 1 - F(t) = P \{z > t\} \quad (1)$$

La función de densidad de la variable aleatoria representa la probabilidad de que el fallo ocurra entre t y $t+\Delta t$.

$$f(t) \Delta t = P \{t \leq z \leq t + \Delta t\} \quad (2)$$

se cumple también que:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt} \quad (3)$$

Se define a la tasa de fallos instantánea $\lambda(t)$, de tal forma que, $\lambda(t) \Delta t$, representa, la probabilidad de que el fallo del sistema ocurra entre t y $t + \Delta t$, suponiendo que estaba operativo en t . Es decir:

$$\lambda(t) \Delta t = P \{t < z < t + \Delta t / z > t\} \quad (4)$$

Esta probabilidad es una probabilidad condicionada de dos sucesos y tal como se indicaba el Teorema de las probabilidades compuestas, puede escribirse como:

$$P \{t < z < t + \Delta t / z > t\} = \frac{P \{t < z < t + \Delta t \cap z > t\}}{P \{z > t\}}$$

que a su vez es igual a:

$$\frac{P \{t < Z < t + \Delta t\}}{P \{Z > t\}}$$

en esta expresión se identifica (1) y (2) por lo que substituyendo en (4) resulta:

$$\lambda(t) \Delta t = \frac{F(t) \Delta t}{R(t)} \quad (5)$$

de donde y utilizando (3)

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{dt R(t)}$$

es decir,

$$\lambda(t) dt = \frac{-dR(t)}{R(t)}$$

Integrando entre 0 y t:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{-dR(t)}{R(t)} = -\ln[R(t)]$$

ya que $R(0) = 1$ (el sistema está operando en el instante $t = 0$)

De donde, finalmente se obtiene la expresión general de la fiabilidad de un sistema expresión (0):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (0)$$

Esta expresión es una función de distribución y su función de densidades de fallos se expresa, tal como se indica en la expresión (3), como derivada de la fiabilidad con respecto del tiempo, así:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (6)$$

(ya que $\phi(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$ ver (5))

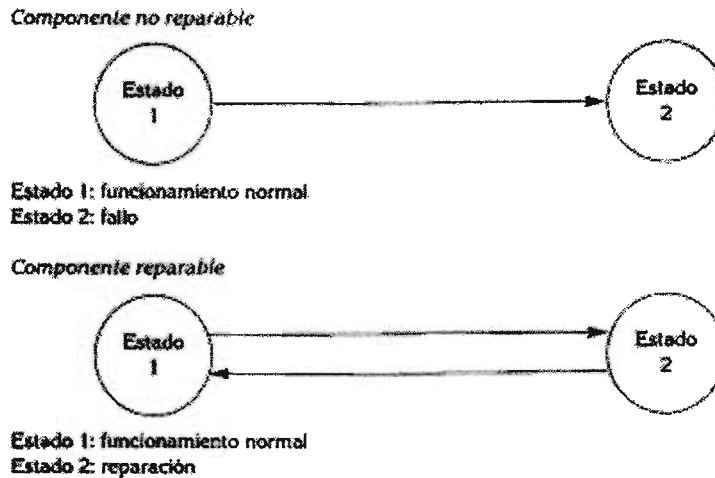
La media o esperanza matemática de esta función se conoce como *MTTF (Mean Time To Failure* o tiempo medio hasta el fallo) y representa la vida media del componente; se expresa como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

El concepto complementario de $R(t)$ es, la *infiabilidad* $F(t)$ o probabilidad de que se produzca el fallo del componente durante el periodo de tiempo t . Se expresa como:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

La expresión (1) corresponde a componentes no reparables. Si se considera que el componente es reparable esto significa que tras un fallo el componente entra en un ciclo de reparación. Se define en este caso el concepto de mantenibilidad $M(t)$ como la probabilidad de que un componente se repare en un período de tiempo comprendido entre 0 y t . Se puede dar a $M(t)$ un tratamiento similar al comentado para la fiabilidad $R(t)$, definiéndose una tasa parecida a la $\lambda(t)$, la tasa de reparación o $\mu(t)$. En el caso de componentes reparables, la disponibilidad es la variable que representa más adecuadamente al componente.



Disponibilidad de un componente: es la probabilidad $A(t)$ de que el componente esté operativo en un instante t .

Su expresión matemática es la siguiente:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t})$$

donde λ es la tasa de fallos y μ la tasa de reparación adoptado en ambos casos una distribución exponencial.

Se asume que el componente se reincorpora al sistema "como nuevo".

Se define el tiempo medio de reparación como *MTTR* (*Mean Time to Repair* o tiempo medio de reparación) como:

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt$$

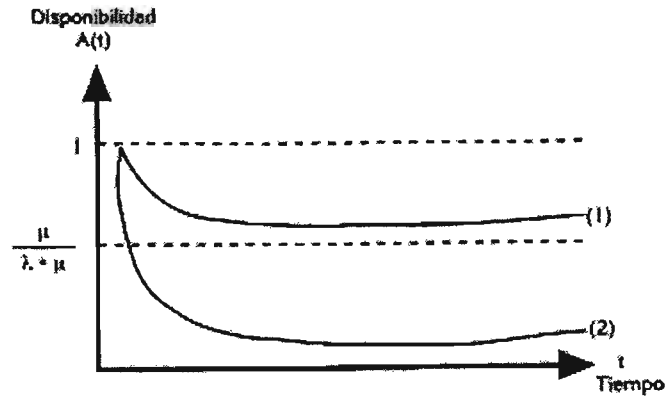
El concepto dual de MTTF es en este caso el de *MTBF* (*Mean Time Between Failure* o tiempo medio entre fallos) que cumple :

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

El concepto complementario de la disponibilidad de un componente es el de su indisponibilidad $Q(t)$ que se define como :

$$Q(t) = 1 - A(t)$$

Para componentes no reparables coinciden los valores de fiabilidad y disponibilidad (Ver figura)



1.2.2 TASA DE FALLOS

Si la variable aleatoria t representa el instante de fallo de un componente y $f(t)$ la función de densidad correspondiente, entonces la expresión:

$$f(t) \cdot \Delta t = P \{t \leq t \leq t + \Delta t\}$$

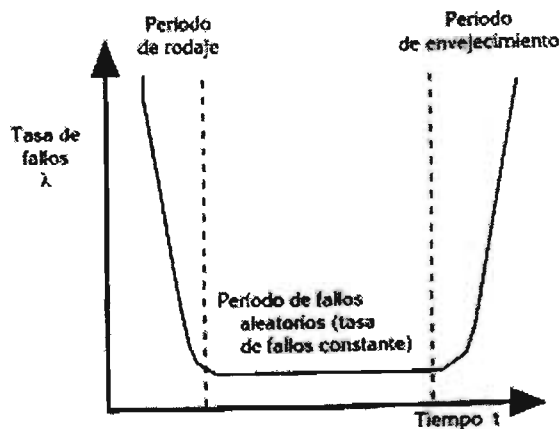
representa la probabilidad de que el fallo del componente ocurra entre t y un diferencial $t + \Delta t$.

La tasa de fallos $\lambda(t)$ se puede definir como:

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

Se trata de una frecuencia de fallos, un valor dimensional, expresado normalmente en fallos por hora. El comportamiento de $\lambda(t)$ con el tiempo es revelador de la causa que provoca el fallo. Este comportamiento suele seguir normalmente una evolución con el tiempo parecido al representado en la denominada «curva de la bañera» (ver figura 1.1)

FIGURA 1.1 CURVA DE LA BAÑERA

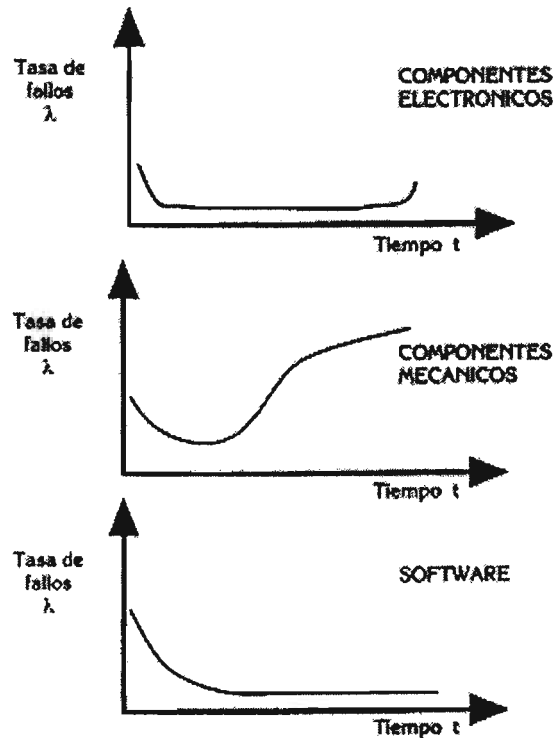


En esta curva se distinguen tres zonas:

1. La primera de corta duración presenta una tasa de fallos elevada pero decreciente. Corresponde a los «fallos infantiles» o defectos de construcción o control de calidad.
2. La segunda zona de más larga duración se mantiene constante en torno a un valor fijo mínimo. Es el período de fallos aleatorios. La causa del fallo no es inherente al componente sino debida a efectos externos.
3. En la zona más extrema la tasa de fallo sufre un crecimiento rápido. Es el período de envejecimiento del componente en el cual el fallo del componente es causado por su desgaste.

Según el tipo de componente se acentúa más una u otra zona de la curva: en componentes electrónicos la primera y la última zona suelen ser reducidas; para componentes mecánicos es esencial la zona de envejecimiento y por último para componentes tipo software es predominante la primera zona (ver figura 1.2)

FIGURA 1.2 CURVAS DE LA BAÑERA PARA DISTINTOS TIPOS DE COMPONENTES



1.2.3 LEYES DE DISTRIBUCIÓN DE LA TASA DE FALLOS

Para calcular la fiabilidad de un componente según la expresión (1) (pag. 12) es necesario adoptar un modelo de descripción de la evolución de la tasa de fallos en el tiempo. En la tabla se indican algunas leyes que permiten modelar mejor un zona o zonas de la curva de la bañera: ley Exponencial, Normal, Gamma, de Weibull, etc. Se proporcionan las fórmulas correspondientes a la tasa de fallos, fiabilidad e in fiabilidad, así como las características principales. Se indican también las representaciones gráficas correspondientes (figura 1.3).

TABLA 1.2 CARACTERÍSTICAS DE DISTINTAS DISTRIBUCIONES

Tipo	Campo de definición de la variable aleatoria y parámetros	Tasa de fallos (t)	Fiabilidad R(t)	Infiabilidad f(t) = 1 - R(t)	Función densidad de fallos f(t)	MTTF	Observaciones
Exponencial	Variable tiempo $t \geq 0$ Parámetro del exponencial $\lambda > 0$	λ	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda}$	Refleja la fase normal de operación, la zona central de la curva de la bañera.
Normal	Variable tiempo $-\infty < t < \infty$ Parámetros de la normal μ desviación estándar σ media	$\frac{(t-\mu)}{\sigma}$	$\frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$	$\frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{t-\mu} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$	$\frac{1}{\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	m	Describe el comportamiento durante el periodo de desgaste del componente. La tasa de fallos es creciente.
Weibull	Variable tiempo $t \geq 0$ Parámetros de la ley $\beta > 0$ $\eta > 0$	$\left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$ si $\beta < 1$ $\lambda(t) = 1/\eta$ si $\beta > 1$ $\lambda(t)$ decrece si $\beta > 2$ $\lambda(t)$	$e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$\frac{\eta}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)$	Permite representar las distintas zonas de la curva bañera según el valor de β .

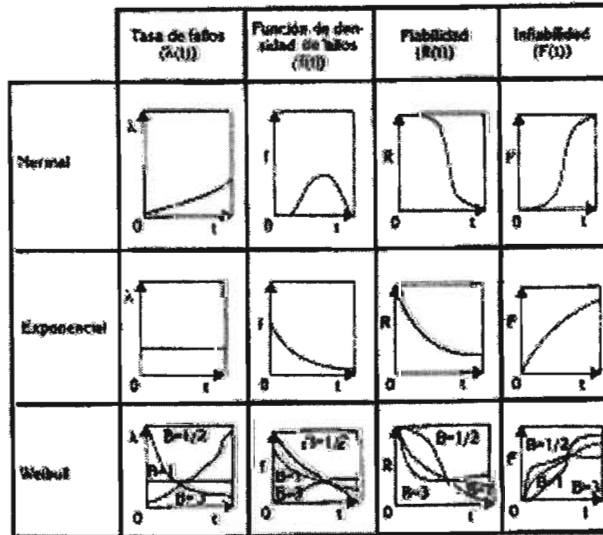
*Donde Γ es la función que se expresa como:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} \cdot e^{-x} dx \text{ para } z > 0$$

Se verifica para valores enteros de z que: $\Gamma(z + 1) = z!$.

Los valores de Γ se encuentran tabulados de forma directa en la mayoría de los manuales de estadística.

FIGURA 1.3 REPRESENTACIONES GRAFICAS DE DIFERENTES LEYES DE DISTRIBUCION

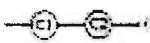

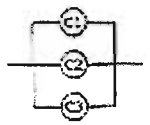
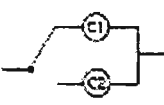


De la tabla 1.2 se desprende que la distribución exponencial destaca especialmente por su sencillez y por este motivo es la más utilizada en la práctica en los bancos de datos de fiabilidad y en los estudios cuantitativos de riesgos. En este caso la tabla de fallos tiene un valor constante, es decir que no considera dependencia con el tiempo de la λ : no se contempla la fase de fallos infantiles ni tampoco de la degradación por envejecimiento.

1.2.4 FIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE UN SISTEMA

Hasta ahora se han descrito los modelos de representación de la fiabilidad de un componente. Para sistemas definidos como conjuntos de componentes, su fiabilidad y disponibilidad se puede calcular en base al tipo de configuración que los une. Algunas configuraciones básicas que se pueden identificar, son las que se describen a continuación. Las expresiones de fiabilidad, se reseñan en la correspondiente tabla 1.3.

TABLA 1.3 FIABILIDAD DE UN SISTEMA

Configuración	Esquema	Expresión booleana de la fiabilidad del sistema	Infabilidad
Serie		Fallo de C1 o Fallo de C2	$P1 + P2 - P1 \cdot P2$
Paralelo		Fallo de C1 y Fallo de C2	$P1 \cdot P2$
Paralelo 2 de 3		Fallo de C1 y C2 o fallo de C1 y C3 o fallo de C2 y C3	$P1 + P2 + P3 - P1 \cdot P3 - P1 \cdot P2 - P2 \cdot P3 + P1 \cdot P2 \cdot P3$
Redundancia pasiva		Fallo de C1 en un instante t y fallo de C2 en garantizar el final del servicio sobre el periodo $T-t$	$\int_0^T F1(t) \cdot f2(t-t) dt$ <p>Probabilidad de que el fallo del primer componente ocurra en el instante t (a).</p> <p>$f2(t-t)$ Probabilidad de que el segundo componente no asegure el servicio desde el instante t hasta $t-t$.</p> <p>Asumiendo una ley de distribución exponencial para la probabilidad de fallos resulta:</p> $1 - \exp(-\lambda_1) - [\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)] \cdot [\exp(-\lambda_1) - \exp(-\lambda_2)] \cdot t$

- (a) C1, C2, C3: componentes del sistema.
- (b) P1, P2, P3: probabilidades de fallos de los componentes C1, C2 y C3.
- (c) F1: función de distribución acumulada, para el componente 1.
- (d) f2: función de densidad, para el componente 2.
- (e) λ_1, λ_2 : tasas de fallos de los componentes C1 y C2. La notación «exp» corresponde a la función exponencial.

Configuración serie: el sistema funciona correctamente, sólo si ambos componentes funcionan correctamente. En Álgebra de Boole la probabilidad de funcionamiento del sistema es una intersección lógica de los sucesos de funcionamiento correcto de ambos.

Configuración paralelo (o redundancia activa): el sistema funciona correctamente, si al menos uno de los dos componentes funciona correctamente. En Álgebra de Boole, la probabilidad de funcionamiento del sistema es una unión lógica de los sucesos de funcionamiento correcto de cada uno de ellos.

Configuración redundancia pasiva: el sistema funciona mientras el sistema principal funciona correctamente o si es suplido cuando falla por el dispositivo redundante en standby que entra en servicio y es capaz de sustituirlo en su misión.

1.3 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE FALLO DE UN SUCESO BÁSICO

1.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Se puede considerar tres fases generales del comportamiento de un componente:

1. El estado de espera o *standby*. El componente no está operativo. Durante esta fase se desconoce su estado a menos que se autodenuncie o que se realicen inspecciones periódicas.
2. El arranque o puesta en servicio del componente.
3. El funcionamiento u operación del componente durante un período determinado.

Se describen a continuación los modelos que se pueden utilizar para representar el componente según sus características.

COMPONENTE CON UNA TASA DE FALLOS CONSTANTE EXPRESADA EN FALLOS POR HORA:

Se recurre a la descripción exponencial de la tasa de fallos y la probabilidad de que el componente tenga su primer fallo en $[0, T]$ se expresa como:

$$F(T) = 1 - R(T) = 1 - e^{-\lambda T}$$

que se puede aproximar a: λT si $\lambda T \ll 1$. (Se demuestra que el error es menor del 10% si $\lambda T < 0, 1$)

Esta expresión muy utilizada en los árboles de fallos es aplicable a componentes en funcionamiento normal o en espera. En este último caso, si T_e representa el tiempo de espera y λ_e la tasa de fallos en espera:

$$F(T_e) = 1 - R(T_e) = 1 - e^{-\lambda_e T_e}$$
$$\approx \lambda_e T_e \text{ si } \lambda_e T_e \ll 1$$

si el producto es suficientemente menor de 1 no se comete mucho error aproximando la exponencial por una relación lineal.

El modelo considera que el componente está "nuevo" en el instante $t = 0$.

COMPONENTE REPARABLE Y MOTORIZADO CON UNA TASA DE REPARACIÓN CONSTANTE:

La indisponibilidad media del componente se expresa como:

$$Q = \lambda_e \cdot T_d / (1 + \lambda_e \cdot T_d) \approx \lambda_e T_d \text{ si } \lambda_e T_d \ll 1$$

Donde λ_e es la tasa de fallos en espera y T_d el tiempo medio fuera de servicio (suma del tiempo necesario para la detección del fallo y del tiempo medio de reparación o sustitución).

COMPONENTE REPARABLE Y NO MOTORIZADO CON UNA TASA DE REPARACIÓN CONSTANTE:

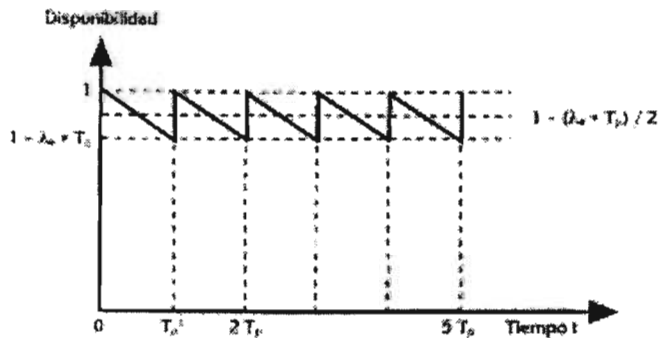
El componente es inspeccionado con una periodicidad T_p detectándose los fallos en los tests periódicos.

La indisponibilidad del componente se expresa como:

$$Q = \lambda_e \cdot T_p/2 + \lambda_e \cdot T_r \approx \lambda_e T_p/2 \text{ si } T_r < T_p$$

Donde λ_e es la tasa de fallos en espera y T_r , el tiempo medio para la reparación o sustitución del componente y T_p el periodo de inspección. (ver figura 1.4)

FIGURA 1.4 DISPONIBILIDAD DE UN COMPONENTE REPARABLE Y SOMETIDO A REVISIONES PERIODICAS



NOTAS:

1. T_p : tiempo entre pruebas periódicas.
2. λ_e : tasa de fallos en espera.
3. Se considera que el tiempo de reparación T_r es despreciable.
4. Se considera que tras la prueba el componente vuelve a una disponibilidad 1.
5. Se considera una tasa de fallos en espera constante y que se puede aproximar la relación exponencial obtenida para la disponibilidad por una relación lineal.

COMPONENTE CON UNA TASA DE FALLOS CONSTANTE EXPRESADA EN FALLOS POR CICLO:

En este caso se considera que el componente tiene una probabilidad p constante de fallar cuando se solicita su entrada en servicio. En este modelo no existe una dependencia respecto del tiempo de espera del componente o del tiempo que tiene que operar. Su in fiabilidad se expresa como:

$$1 - R_c = q_c \approx np$$

donde q_c es la indisponibilidad a la "demanda" o probabilidad de fallo al solicitarse la entrada en servicio, n el número de demandas y R_c , su fiabilidad.

Por último, un mismo componente puede ser descrito a través de un modelo compuesto con varias de las ecuaciones indicadas para representar distintos estados.

En la tabla 1.4 se agrupan las ecuaciones anteriores dando ejemplos de componente de cada caso.

TABLA 1.4 MODELOS DE REPRESENTACION DE LA INFIABILIDAD/INDISPONIBILIDAD DE UN SISTEMA

Modelo	Expresión de su infiabilidad / indisponibilidad	Ejemplo
Componentes con tasa de fallos constante expresada en fallos por hora	<p>Componente operativo: $F(T) = 1 - \exp(-\lambda * t)$ (a) que se puede aproximar a: $\lambda * T$ si $\lambda * T \ll 1$ (b) λ: Tasa de fallos en operación T: Tiempo de operación considerado</p> <p>Componente en espera: $F(T_e) = 1 - \exp(-\lambda_e * T_e)$ Que se puede aproximar a: $\lambda_e * T_e$ si $\lambda_e * T_e \ll 1$ donde: λ_e y T_e idem en espera</p>	<p>Bomba en que $T = 0$ esta arrancada. Modo de fallo Parada de la bomba</p>
Componente en espera reparable motorizado con tasa de reparación constante	<p>$Q = \lambda_e * T_e / (\lambda_e * \lambda_d + 1)$ Que se puede aproximar a: $\lambda_e * T$ si $\lambda_e * T < 1$ donde: λ_e: Tasa de fallos en espera. T_e: Tiempo fuera de servicio (tiempo medio necesario a la detección del fallo y a la reparación o sustitución)</p>	<p>Válvula motorizada normalmente abierta cierre indebido. Modo de fallo: En ambos casos se supone que el componente es no reparable, en $T = 0$ esta "como nuevo" y no sufre desgaste con el tiempo.</p>
Componente reparable no motorizado con tasa de reparación constante	<p>$Q = \lambda_e * T_p / 2 \lambda_e * T_r$ Que se puede aproximar a: $\lambda_e * T_p / 2$ si $T_r \ll T_p$ donde: λ_e: Tasa de fallos en espera T_p: Tiempo de medio entre pruebas. T_r: Tiempo de medio de reparación.</p>	<p>Detector de gas, Alarma ...</p>
Componente con tasa de fallos constante expresada en fallos por ciclo	<p>$Q = n * P$ donde: n : número de demandas. P: probabilidad de no arrancar bajo demanda</p>	<p>Bomba contra incendio</p>
Modelo compuesto	<p>$\lambda_e * (1 - C) + C * \lambda + C / t * P$ donde: λ_e: Tasa de fallos en espera λ: Tasa de fallo en servicio. P: Probabilidad de fallo a la demanda. C: Fracción de servicio del componente. T: Tiempo tras el cual entra periódicamente en servicio.</p>	<p>Bomba en standby parada que es arrancada y que tiene garantizado un tiempo de servicio.</p>

(a) Se utiliza la anotación literal de la ley exponencial.

(b) Se entiende que es sustancialmente menor que 1.

1.3.2 BANCO DE DATOS DE FIABILIDAD DE COMPONENTES

En la tabla 1.5 se describen algunos de los bancos de datos de fiabilidad más destacados.

TABLA 1.5 BANCOS DE DATOS DE FIABILIDAD DE COMPONENTES

Fuente	Características	Fecha	Datos que proporciona
WASH-1400	Banco de datos utilizado en el análisis probabilista de seguridad de las plantas nucleares de Surry (PWR) y Peach Bottom II. Origen: Nuclear	1975	λ_o : Tasa de fallos en operación (fallos / hora). λ_s : Tasa de fallos en espera (fallos/hora). Qd: Tasa de fallos en demanda (fallos/demanda). Proporciona tasas de fallos para distintos modos de fallos. Considera una distribución lognormal para las tasas proporcionando valor mediano, factor de error y rango de variación.
RUNMOND	Recopilación de datos bibliográficos principalmente WASH-1400/UKAEA* (Nuclear) Origen: Varios.	1978	Según la fuente (fallos por hora, año, en demanda), proporciona el rango de variación y los modos de fallos.
BANDAFF	Banco de datos del ENI** basado en datos recogidos sobre 6000 equipos durante el periodo de 1978-1982 Origen: Petroquímica.	1982	Proporciona datos sobre la muestra estadística. Indica tasas de fallos por hora o por demanda, tiempo medio de reparación, así como el rango de variación de la tasa.
OREDA***	Banco de dato inglés sobre componentes de plataformas petrolíferas. Origen: Petroquímicas	1984	Agrupar los componentes en distintas categorías y proporciona para cada uno de ellos: Items totales de la población, número de operación acumulado, número de fallos registrados: la tasa de fallos valor más bajo medio y máximo y valores mínimos, medios y máximos de reparación
CRYSTAL RIVER III	Banco de datos utilizado en el análisis probabilista de seguridad de la planta nuclear de Cristal River III. Recogida de datos bibliográficos de otros, Análisis probabilísticas de Seguridad en plantas nucleares. Origen: Nuclear.	1985	Proporciona la mediana, valor correspondiente al 5% de la distribución acumulada, 95% de la misma y el factor de error de la ley lognormal de ajuste de la dispersión. Proporciona fallos por hora o por demanda para cada modo de fallo.
COMP	Banco de datos de fiabilidad de componentes. Los datos procedentes de distintas fuentes. Tiene soporte informático.	1989	Agrupar los componentes en categorías y permite realizar la búsqueda a través de distintos parámetros tales como tipo, uso, ... Proporciona para el modo de fallo contemplado la tasa de fallos (fallos/hora), así como la referencia bibliográfica correspondiente.

* United Kingdom Atomic Energy Agency.

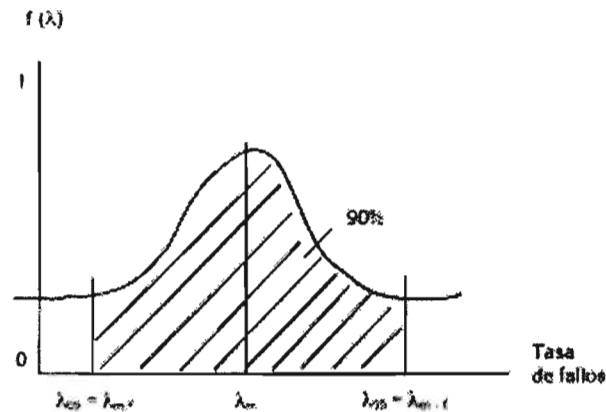
** Ente Nazionale d'Idrocarburi.

*** Offshore REliability Data.

De esta tabla se desprenden los siguientes comentarios:

1. Existen pocos bancos de datos de procedencia exclusivamente química.
2. Los datos de procedencia "nuclear" deben ser utilizados con el debido cuidado ya que por sus características son relativamente distintas.
3. Los bancos de datos dan en general una medida de la incertidumbre que pesa sobre el dato acotándolo en un intervalo de variación. En general, el modelo utilizado para describir la incertidumbre asociada a la tasa de fallo λ consiste en considerarla como una variable aleatoria que sigue una ley de densidad de tipo logarítmico normal caracterizado por una media λ_m (igual a la mediana) y un factor de error f . La tasa de fallos se concentra con un 90% de probabilidad entre un valor máximo ($\lambda_m \times f$) y mínimo (λ_m / f). En el esquema que sigue se representa la ley de distribución de la

variable aleatoria "tasa de fallos" señalándose en abcisas los valores de la tasa y en ordenadas las probabilidades de obtener estos valores.



donde:

- λ_m : mediana de la distribución lognormal (su probabilidad acumulada es del 50%)
- λ_{05} : valor de la tasa de fallos para el cual la probabilidad acumulada de obtener un valor más pequeño es del 5%.
- λ_{95} : valor de la tasa de fallos para el cual la probabilidad de obtener un valor inferior o igual es del 95%.
- $f(\lambda)$: función de densidad de la ley de distribución de la variable aleatoria tasa de fallos.
- $///$: área con una probabilidad acumulada del 90% de que la tasa de fallos, se halla dentro del rango $[\lambda_{05}, \lambda_{95}]$ (abcisas de las rectas verticales que delimitan el área).

Los cálculos de frecuencia deben de tomar en consideración estos intervalos de variación de la tas de fallos.

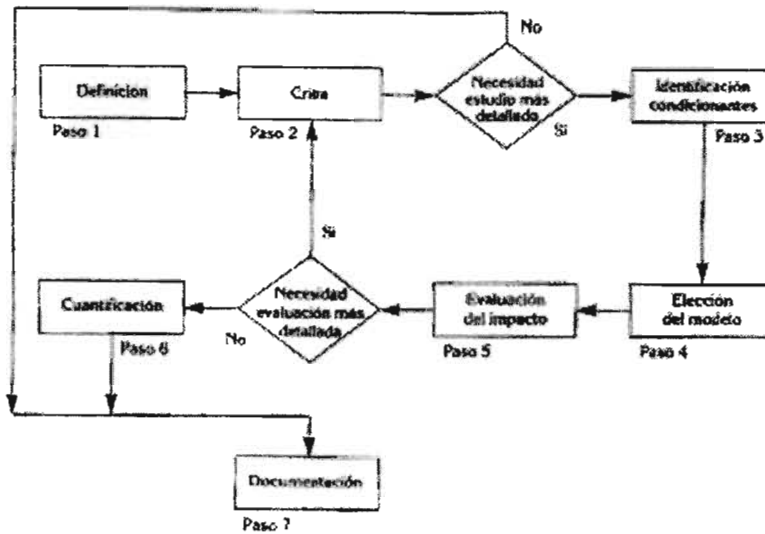
1.3.3 DETERMINACIÓN DEL FALLO HUMANO

El componente humano aparece en los sistemas estudiados como un elemento más, para el cual también es necesario proceder a una evaluación. Puede constituir tal como se ha indicado ya con anterioridad: un iniciador de un accidente (error en una operación de purga, por ejemplo) o un condicionante a su evolución (fallo en no detectar una alarma).

En este caso todavía es más difícil que en el caso de los componentes técnicos determinar tasas de fallos, por la multitud de factores que intervienen: factores internos (formación, capacidad y características personales) o externos (condiciones de trabajo, tipo de actividad, etc.).

El método SHARP (*Systematic Human Análisis Reability Procedure*) constituye una metodología sistemática para determinar que operaciones humanas es necesario analizar y que modelos son los más adecuados. Se indica en la figura 1.5.

FIGURA 1.5 METODOLOGIA SHARP (1)



(1) Systematic Human Analysis Reliability Procedure.

Los pasos principales de la metodología se describen brevemente a continuación:

Definición: Se describen todas las operaciones humanas que hayan aparecido en el análisis realizado y que se tengan que evaluar. Típicamente serán los sucesos relacionados con actuaciones humanas identificadas en otras fases de proceso y aplicando otras técnicas: determinados eventos básicos de los árboles de fallos o sucesos. Un ejemplo de evento de este tipo sería: "operador no cierra la válvula V-23"

Criba: Se determina si se puede evaluar todos estos sucesos de forma sencilla o si es necesario proceder a un estudio más detallado.

Si no es necesario un estudio detallado se recogen los datos y se archivan debidamente documentados (es decisivo guardar las referencias de los cálculos llevados a cabo para que puedan ser reproducidos y eventualmente actualizados posteriormente).

Identificación de condicionantes: Si es necesario un estudio detallado conviene determinar en primer lugar los condicionantes del suceso a evaluar:

- Condiciones entorno (por ejemplo, en el caso de cierre de una válvula en accesibilidad, esfuerzo físico necesario, etc.).
- Tipo de situación (en situación normal, en una emergencia...).
- Imperativos de tiempos de actuación.
- Tipo de actuación (rutinaria, poco habitual, etc.).

Elección del modelo: Según las características del suceso se determina la técnica de evaluación más apropiada, estas se describen en los siguientes apartados.

Evaluación del impacto: Se realiza una primera evaluación para determinar el impacto que puede tener el evento sobre los sucesos complejos estudiados. De ser relevante el impacto, sería necesario volver a repetir los pasos anteriores para "afinar" en la selección de la técnica aplicar; sino, se puede proceder a la cuantificación final.

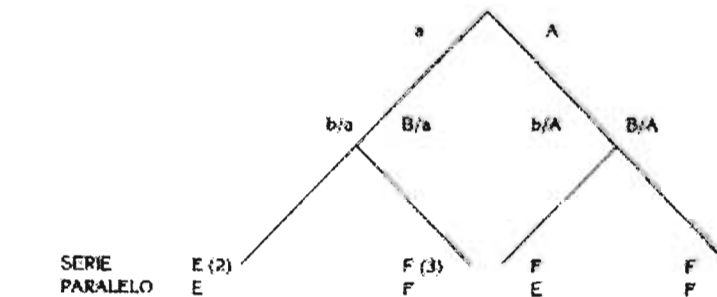
Los modelos a utilizar para la cuantificación se puede agrupar en los tres grandes grupos que se comentan en los apartados siguientes.

TÉCNICAS DE DESCOMPOSICIÓN. Proceden a descomponer la operación a realizar en tareas individuales para las cuales se dispone de datos y reconstruir posteriormente el fallo sobre la base de la estructura lógica de enlace de las distintas operaciones y posibilidades de error asociadas.

Un ejemplo de esta técnica de descomposición lo constituye la técnica THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*) descrita en el *Handbook for Human Reliability on with emphasis to Nuclear Power Plant*. La técnica consiste en planear para cada tarea, en que se puede descomponer la operación, el éxito o fallo en su realización, a través de una bifurcación parecida a la de los árboles de sucesos. La diferencia principal reside, en este caso, en que se consideran probabilidades condicionadas, es decir, que la correcta/incorrecta realización de una tarea puede influir sobre la actuación en la tarea siguiente. En el árbol de sucesos se consideraban los eventos como independientes.

En la figura 1.6 / I se indica el esquema general de la técnica para una operación que consta de dos tareas "A" y "B".

FIGURA 1.6 / I ESQUEMA GENERAL DE LA TECNICA THERP (1)



ACCIÓN «A» = PRIMERA TAREA DE LA OPERACIÓN.
 ACCIÓN «B» = SEGUNDA TAREA DE LA OPERACIÓN

a = Probabilidad de realizar correctamente «A»
 A = Probabilidad de fallar en realizar «A»
 b/a = Probabilidad de realizar correctamente «B» dada la correcta realización de «A»
 B/a = Probabilidad de fallar en realizar «B» dada la correcta realización de «A»
 b/A = Probabilidad de realizar correctamente «B» dado que se falla en realizar «A»
 B/A = Probabilidad de fallar en realizar «B» dado que se falla en realizar «A»

Para el sistema «serie», las probabilidades de éxito y fallo son:
 $Pr(E) = a \cdot b/a$
 $Pr(F) = 1 - a \cdot b/a = a \cdot B/a + A \cdot b/A + A \cdot B/A$

Para el sistema «paralelo», las probabilidades de éxito y fallo son:
 $Pr(E) = 1 - A \cdot B/A = a \cdot b/a + a \cdot B/a + A \cdot b/A$
 $Pr(F) = A \cdot B/A$

- (1) *Technique for human error prediction.*
- (2) E: Éxito.
- (3) F: Fallo.
- (4) P_i(j): Probabilidad.

La primera acción del esquema es "A" y puede realizarse correctamente, con una probabilidad anotada en minúsculas, a, o de forma incorrecta, con una probabilidad anotada en mayúsculas, A.

La segunda acción es "B" y puede ser realizada de forma correcta o incorrecta, según se haya realizado anteriormente la acción "A".

Si b y B son respectivamente las probabilidades de éxito/fallo de la acción "B", las probabilidades de éxito de la acción "B" condicionadas por el resultado de "A" se expresa como:

$$b/a$$

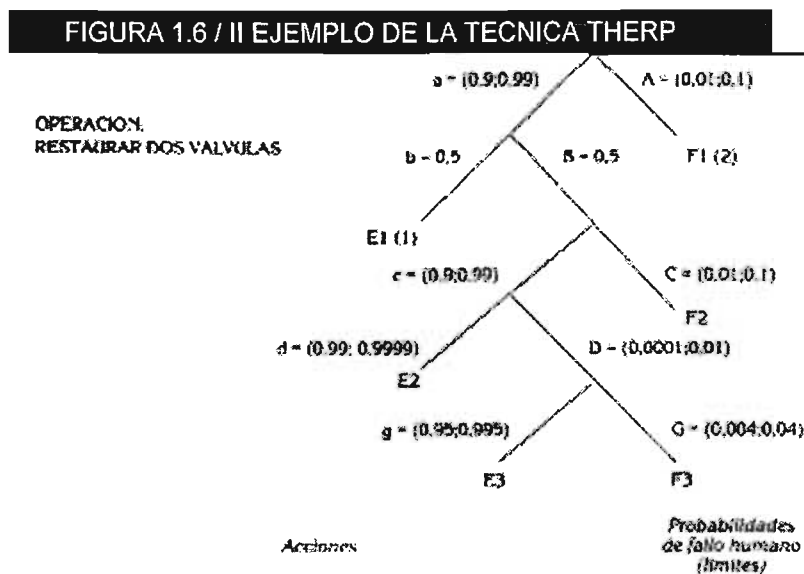
$$b/A$$

La probabilidad de una secuencia se expresa como producto de las probabilidades de las acciones de la secuencia. En el esquema se indican dos criterios de éxito.

Serie: es necesario que ambas acciones se realicen de forma adecuada.

Paralelo: es necesario que al menos una de las dos sea llevada a cabo con éxito, y cada uno de ellos se determina la expresión de su probabilidad de éxito y fallo.

En la figura 1.6 / II se reseña un ejemplo, que corresponde a la restitución a la posición correcta de dos válvulas tras una operación de mantenimiento.



- | | | |
|-------|--|---------------------|
| «A» = | Fallo en iniciar la restitución al servicio de las válvulas (Éxito: a, fallo: A) | 0,05 (0,01;0,1) |
| «B» = | Las válvulas son grandes y separadas (Éxito: b, fallo: B) | 0,5 |
| «C» = | Fallo en restaurar al servicio la segunda válvula (Éxito: c, fallo: C) | 0,05 (0,01;0,1) |
| «D» = | La válvula se encalla (Éxito: d, fallo: D) | 0,001 (0,0001;0,01) |
| «G» = | Fallo en restaurar al servicio una válvula de forma completa, llevando traje de protección especial (Éxito: g, fallo: G) | 0,01 (0,004;0,04) |

(1) E1, E2, E3: situaciones de éxito del sistema.

(2) F1, F2, F3: situaciones de fallo del sistema

En el esquema, la primera bifurcación corresponde al suceso «Iniciar la restitución de las válvulas al servicio», (acción A) se plantean dos situaciones:

- No se inicia la operación. Se considera, entonces, que al omitirse el primer paso la operación se omite de forma global. El resultado, por tanto, es fallo de la operación (suceso final F1).
- Si se inicia la operación actuando correctamente sobre la primera válvula, la bifurcación que se plantea analiza el tipo de válvulas (suceso B). Si las válvulas son pequeñas y próximas se supone que el operador tras haber accionado la primera válvula tiene una probabilidad de éxito seguro al accionar la segunda válvula, lo que conduciría a una situación de éxito, E1. En cambio, si las válvulas son grandes y separadas existe la posibilidad de una omisión al actuar la segunda válvula.
- En tal caso, caben de nuevo dos posibilidades: 1) que se omita la restitución de la segunda válvula al servicio, lo que conduce a la segunda situación de fallo F2. 2) Si no se omite la operación sobre la segunda válvula, cabe la posibilidad de que se haga de forma incompleta (válvula semi abierta o semi cerrada).
- Si se hace de forma completa la situación final es de éxito: E2.
- Si se hace de forma incompleta cabe la posibilidad de que el operador se dé cuenta de la posición intermedia de la válvula (suceso G) y la corrija, lo que conduciría a la situación de éxito E3 o de fallo F3.

Las posibilidades reseñadas no son valores puntuales sino que se consideran intervalos de valores posibles para cada caso.

Por último, el éxito del sistema se expresa $E1 + E2 + E3$

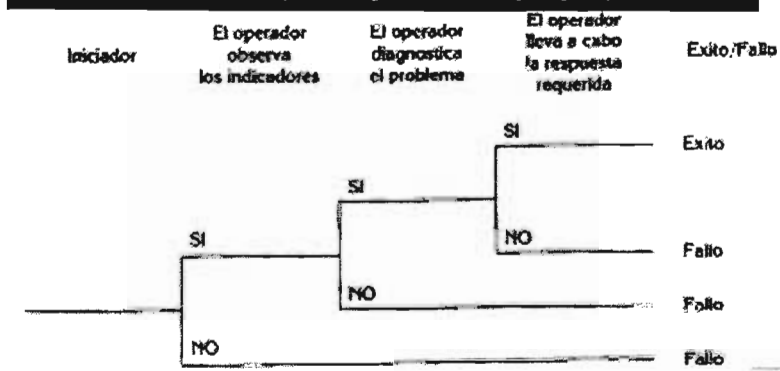
$$a.b + aBcd + aBcDg$$

el fallo es $F1 + F2 + F3$:

$$A + a.B.C + a.B.c.D.G$$

El OAT (*Operator Action Tree*) también es una técnica que se puede englobar en este grupo. En este caso la descomposición se hace sobre la base del proceso mental seguido por el operador antes de tomar una decisión (detección de la anomalía, diagnóstico e intervención). La estructura es parecida al árbol de sucesos. Ver figura 1.7

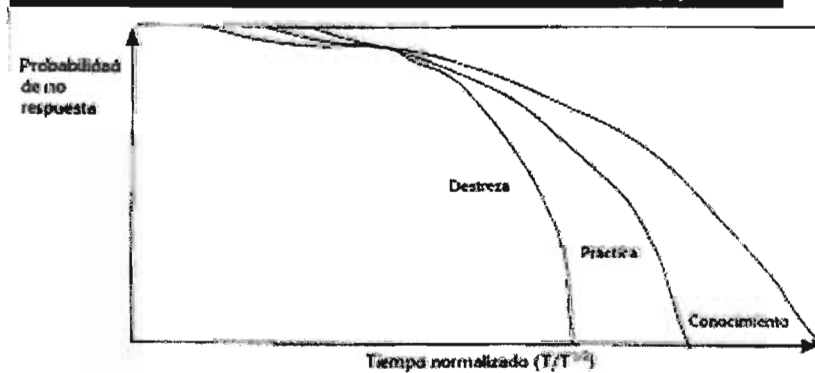
FIGURA 1.7 EJEMPLO DE LA TECNICA OAT



TÉCNICAS QUE EVALUAN EL FALLO HUMANO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DISPONIBLE PARA LA INTERVENCIÓN

Esta técnica se utiliza sobre todo para representar la toma de decisión del operador en situaciones de emergencia en las cuales el tiempo disponible suele ser escaso. Según el tipo de operación proporciona una probabilidad de fallo. Las curvas sobre las cuales se basa el método fueron calculadas mediante los experimentos realizados para la formación de operadores de centrales nucleares en simuladores. Ver figura 1.8

FIGURA 1.8 EJEMPLO DE LA TECNICA HCR(1)



T Tiempo medio requerido por un equipo experto en unas condiciones óptimas para realizar una operación.
 $T^{0.5}$ Tiempo que se tarda en realizar una operación en una situación real.

(1) Human Cognitive Rate.

TÉCNICA TIPO "JUICIO EXPERTO"

Las técnicas se basan en una ponderación de diferentes parámetros que representan los distintos factores que influyen sobre el desarrollo de la actividad (entorno, tipo de actividad, capacidad del operador, nivel de stress). Ver figura 1.9, donde se indica el ejemplo del código TESEO.

FIGURA 1.9 METODO TESEO

TESEO	
K1 TIPO DE ACTIVIDAD	
Rutinaria	
Rutinaria que requiere atención	
No rutinaria	
K2 STRESS POR TIEMPO DISPONIBLE	
Actividades rutinarias: 2, 10, 20 seg.	
Actividades no rutinarias: 3, 30, 45, 60 seg.	
K3 TIPOLOGIA DEL OPERADOR	
Experto muy entrenado, cuidadosamente seleccionado	
Conocimiento, entrenamiento general	
Conocimiento, entrenamiento superficial	
K4 FACTOR ANSIEDAD	
Grave emergencia	
Potencial emergencia	
Normal	
K5 FACTOR ERGONOMICO	
Microclima	Interfase planta
Excelente	Excelente
Buena	Buena
Discreta	Discreta
Mala	Mala
EJEMPLO DE APLICACION	
Programa para la estimación de la fiabilidad de operadores en salas de control.	
Descripción de la operación: Operador de panel número 1.	
.K1 Tipo de actividad:	Rutinaria. Requiere atención.
.K2 Tiempo disponible para realizarla:	15 s.
.K3 Tipología del operador:	Cuidadosamente seleccionado, experto, bien entrenado.
.K4 Factor de ansiedad:	Situación de emergencia potencial.
.K5 Calidad del microclima:	Buena.
.K6 Calidad del interfase:	Buena.
Resultados de la simulación:	
Factores:	
.K1 Actividad:	.01
.K2 Stress por tiempo:	.75
.K3 Tipología del operador:	.5
.K4 Ansiedad:	2
.K5 Ergonomía:	1
Probabilidad de que el operador falle en su remisión:	$K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5$: .0075
Tasa de éxito:	$(1 - K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5) \times 100\%$: 99.25

1.4 DETERMINACION DE FRECUENCIAS DE SUCESOS COMPLEJOS

1.4.1 MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS

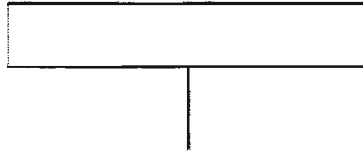
DESCRIPCIÓN

La técnica del árbol de fallos nació en 1962 con su primera aplicación a la verificación de la fiabilidad de diseño del cohete Minuteman. Posteriormente ha sido aplicada sobre todo inicialmente en el campo nuclear y posteriormente en el campo químico. Los árboles de fallos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporciona resultados cualitativo y cuantitativos.

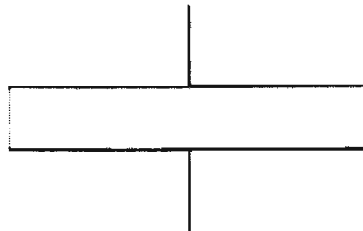
Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él y calcular su probabilidad.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado suceso TOP en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos para los cuales se puede calcular la probabilidad de fallos.

Suceso TOP: Ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo del cual se desconoce la probabilidad de fallos. Tiene que estar claramente definido (condiciones, etc.)



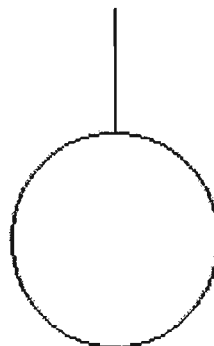
Sucesos intermedios: Son los sucesos intermedios que son encontrados en el proceso de descomposición y que a su vez pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallo en rectángulos.



Sucesos básicos: Son los terminales de la descomposición. Tienen asociada una probabilidad de ocurrencia determinada y pueden representar cualquier tipo de suceso de los que se han citado con anterioridad: sucesos de "fallos" como por ejemplo: infidelidad o indisponibilidad de un componente, error humano, etc. o sucesos de "éxito" ocurrencia de un evento determinado. Se representan en círculos en la estructura del árbol.

En el proceso de descomposición del árbol se recurre a una serie de *puertas lógicas* que representan los operadores del álgebra de sucesos. Los dos tipos más elementales corresponden a las puertas AND y OR cuyos símbolos se indican a continuación. La puerta OR se utiliza para indicar un "O" lógico: significa que la salida lógica S ocurrirá siempre y cuando ocurra por lo menos una de las dos entradas lógicas e_1 o e_2 .

La puerta lógica AND se utiliza para indicar un "Y" lógico. Para que ocurra la salida lógica S es necesario que ocurra conjuntamente las dos entradas lógicas e_1 y e_2



SUCESO BASICO

Se suele numerar las puertas del árbol para facilitar su identificación. En la tabla 1.6, extracto del *Fault Tree Handbook*, 1987 se indican otro tipo de puertas lógicas (menos utilizados) y su simbología

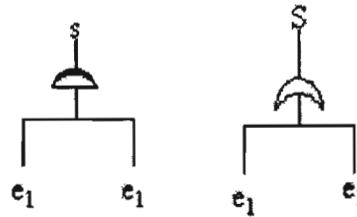












TABLA 1.6 SIMBOLOGIA DEL ARBOL DE FALLOS



SUCESOS BASICOS

-  **SUCESO BASICO**. Suceso básico que no requiere posterior desarrollo.
-  **SUCESO DE CONDICIÓN**. Condición específica o restricción que se aplica a cualquier puerta lógica (se utiliza principalmente con las puertas lógicas Y PRIORITARIO y INHIBIDO).
-  **SUCESO NO DESARROLLADO**. Un suceso no se desarrolla porque sus consecuencias son despreciables o porque no hay información suficiente.
-  **SUCESO EXTERNO**. Un suceso que normalmente ocurrirá.
-  **SUCESO INTERMEDIO**. Un suceso de fallo que ocurre porque una o más causas anteriores ocurren a través de unas puertas lógicas.

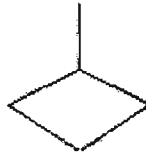
PUERTAS LOGICAS

-  El suceso de fallo de salida ocurre si las entradas se producen.
-  El suceso de fallo de salida ocurre si al menos una de las entradas se produce.
-  El suceso de fallo de salida ocurre si ocurre exactamente una de las entradas.
-  **Y PRIORITARIO**. El suceso de fallo de salida ocurre si todas las entradas se producen en una determinada secuencia (representada por el suceso **CONDICIÓN** dibujado a la derecha de la puerta lógica).
-  **INHIBICIÓN**. El suceso de fallo de salida ocurre si la entrada ocurre en el caso en que se produzca una condición (representada por el suceso **CONDICIÓN** dibujado a la derecha de la puerta lógica).

TRANSFERENCIAS

-  **Transferencia de entrada**. Indica que el árbol de fallos se desarrolla posteriormente donde aparece el símbolo de transferencia de entrada.
-  **Transferencia de salida**. Indica que esta posición del árbol debe relacionarse con el símbolo de transferencia de entrada.

Sucesos no desarrollados: Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos que por su complejidad son a su vez difíciles de evaluar bien por falta de información o bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y para una evaluación cuantitativa será necesario hacer una estimación de su probabilidad. Se tratan como sucesos básicos.



SUCESOS NO DESARROLLADOS

En la técnica del árbol de fallos cabe destacar dos fases bien diferenciadas: la primera consiste en la elaboración del árbol y la segunda en su cuantificación.

A) ELABORACIÓN DEL ÁRBOL DE FALLOS

En esta fase se integran todos los conocimientos sobre el funcionamiento y operación de la instalación con respecto del suceso estudiado.

El primer paso consiste en identificar el suceso “no deseado” o suceso TOP que ocupará la cúspide de la estructura gráfica representativa del árbol. De la definición clara y precisa del TOP depende todo el desarrollo del árbol.

Con este TOP se establecen de forma sistemática todas las causas inmediatas que contribuyen a su ocurrencia, definiendo así los sucesos intermedios unidos a través de las puertas lógicas. El proceso de descomposición de un suceso intermedio se repite sucesivas veces hasta llegar a los sucesos básicos o componentes del árbol.

B) CUANTIFICACION DEL ÁRBOL DE FALLOS

Para ello se reduce la lógica del árbol hasta obtener las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la ocurrencia del propio TOP. Cada una de estas combinaciones, también llamadas conjunto mínimo de fallo (*minimal cut set* en la nomenclatura anglosajona), corresponde a la intersección lógica (en Álgebra de Boole) de varios sucesos elementales. Como por hipótesis de los árboles de fallo se supone que los sucesos básicos son mutuamente independientes (es decir, que la ocurrencia de uno de ellos no tiene influencia sobre la ocurrencia de otro), la probabilidad de un conjunto mínimo de fallo viene dada por el producto de las probabilidades de los sucesos elementales que lo componen.

A su vez el suceso TOP viene representado por la unión lógica de todos los N conjuntos mínimos de fallos y se evalúa su probabilidad $P(TOP)$ aplicando el “teorema de las probabilidades totales o de Poincaré”,

$$P(TOP) = \sum_{i=1}^N C_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N C_i * C_j + \sum_{i=1}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} \sum_{k=i+2}^N C_i * C_j * C_k + \dots + (-1)^{N-1} * C_i * C_j * C_k \dots C_N \quad (1)$$

Donde C_i designa la probabilidad de un conjunto mínimo de fallos:

$$C_i = \prod_{s=1}^P a_s$$

siendo a_s la probabilidad de s -ésimo suceso básico del conjunto mínimo de P sucesos (o de orden P).

Se suele aproximar la expresión (1) truncándola en el primer término. Esta simplificación, que se conoce como la del "suceso raro", facilita los cálculos y el error que se comete se puede despreciar. Algunos códigos informáticos de tratamiento de árboles de fallo permiten determinar el error cometido.

En los análisis mediante árboles de fallos se suelen recurrir a otros estudios para acotar mejor los resultados. Entre ellos se destacan los análisis de incertidumbre y las clasificaciones de los sucesos base según distintas medidas de importancia. Se comenta brevemente a continuación cada uno de estos puntos.

C) ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Las tasas de fallos de los componentes que aparecen en un árbol de fallos deben ser extraídas de los bancos de datos de fiabilidad. Básicamente se pueden considerar tres tipos de bancos:

1. de origen nuclear que recogen la larga experiencia operativa en numerosas plantas nucleares en el mundo y especialmente americanas (WASH-1400, CRISTAL RIVER III, etc).
2. Bancos de datos semi bibliográficos que incluyen datos extraídos de muy diversos orígenes (Rijnmond, etc)
3. Bancos de datos específicos (OREDA para plataformas petrolíferas, por ejemplo)

Estos bancos estudian el comportamiento de un cierto número de equipos a lo largo del tiempo. Posteriormente los datos recogidos son tratados estadísticamente para obtener un valor representativo. Sin embargo, la mayoría de los bancos de datos proporcionan no sólo un valor medio, sino que lo acompañan de un intervalo de variación dentro del cual podría oscilar el valor.

Esta dispersión obedece al hecho de que, en muchos casos, han entrado, en la "población" estadística considerada, componentes que:

- Trabajan en condiciones exteriores distintas (atmosféricas, entorno, etc.) o con productos diferentes
- Son de características constructivas no directamente comparables,
- O están sometidos a políticas de mantenimiento no semejantes.

El valor medio extraído es, por tanto, un dato genérico que puede no adecuarse al caso en estudio.

Se considera habitualmente que la dispersión que existe sobre datos de este tipo puede ser descrita o ajustada a través de una ley de distribución logarítmica normal caracterizada por dos parámetros: un valor mediano (m) (que tiene acumulado un 50% de probabilidad) y un factor de error. Este factor de error (f) delimita un intervalo de variación para la probabilidad de fallo del componente definido como:

[min, max]

donde: $\min = m/f$
 $\max = m \cdot f$

La tasa de fallos estará situada en el intervalo reseñado en un 90% de los casos.

La escasez de datos propios de plantas químicas, por un lado, y su falta de especificidad (adecuación al caso concreto estudiado), obliga a intentar medir la dispersión que puede existir sobre el resultado de una evaluación de un árbol de fallos en función de la dispersión que puedan tener los datos de partida. Este estudio es el denominado *análisis de incertidumbre*.

El análisis de incertidumbre consiste en medir la dispersión existente sobre el suceso TOP en función de la que puedan tener los fallos básicos.

En el caso en que se conoce la ley de distribución de los componentes básicos del árbol, se suele recurrir al Método de Montecarlo que consiste en:

- Para cada componente se simula aleatoriamente una tasa de fallo. Para ello se genera un número aleatorio entre 0 y 1 que corresponde a la probabilidad de una determinada tasa; conocida la ley de distribución, se determina entonces la tasa de fallos correspondiente.
- Con los n valores de tasas de fallos generados aleatoriamente dentro de las distribuciones respectivas y correspondientes a los n componentes del árbol de fallos, se realiza una evaluación del árbol de fallos.
- Se repiten N veces la operación con un nuevo conjunto de n-valores de cada caso.

Al final se obtienen N valores posibles del suceso TOP que a su vez puede ser tratados estadísticamente para calcular:

- Valor medio.
- Intervalo de variación.

El proceso descrito tiene que ser llevado a cabo mediante ordenador.

D) ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

Con las medidas de importancia se pueden clasificar los conjuntos mínimos de fallos o los sucesos básicos según los criterios que permiten determinar los que son críticos para instalación. Las principales medidas de importancia son tres que se describen seguidamente. Es de notar que según las fuentes, las denominaciones e incluso las expresiones varían, aunque al ser valores relativos, no se alteran las conclusiones que se pueden extraer de este tipo de estudios.

Medida de importancia RAW (Risk Achievement Worth): Se define como el cociente entre la suma de las probabilidades de los conjuntos mínimos donde aparece el componente, asumiendo para éste una probabilidad de fallo de 1 (fallo seguro), y la probabilidad total del suceso TOP. Este factor mide la degradación que sufre el sistema en caso de ocurrir el fallo del componente. Tiene en cuenta la importancia "estructural", de un componente. Por ejemplo para un componente que constituye un conjunto mínimo de fallo de orden uno este factor es igual a la inversa de la probabilidad del suceso TOP. La expresión matemática del factor RAW respecto al componente C es:

$$= \sum_{i=1}^N p(C_i) / \sum_{i=1}^N p(C_i) \text{ y } P(C)=1$$

donde:

- C: es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.
- C_i : es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.
- $P(C_i)$: es la probabilidad de C_i .
- $C \in C_i$: representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i .
- $P(C) = 1$ indica que el componente C adopta una tasa de fallos igual a 1 (fallo seguro).

Medida de importancia RRW (Risk Reduction Worth): Se define como el cociente entre la probabilidad total del suceso TOP y la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos, asumiendo para el componente una tasa de fallo nula. Este factor proporciona el coeficiente por el cual quedaría dividida la frecuencia total del suceso TOP analizado en el caso de que el componente fuera perfecto. Este factor permite qué componentes se tienen que modificar para reducir apreciablemente el riesgo. La expresión matemática del factor RRW respecto del componente C es:

$$= \sum_{i=1}^N p(C_i) / \sum_{i=1}^N p(C_i) \text{ y } P(C)=0$$

donde:

- C: es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.
- C_i : es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.
- $P(C_i)$: es la probabilidad de C_i .
- $P(C) = 0$ indica que el componente C adopta una tasa de fallos igual a 0 (no falla el componente)

Medida de importancia de Fussell-Vesely: Se define el factor de importancia de Fussell-Vesely respecto de un componente C como cociente entre la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos que contienen a este componente y la probabilidad total (o suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos). Su expresión es:

$$\sum_{i=1}^N p(C_i) / \sum_{i=1}^N p(C_i) \text{ y } C \in C_i$$

donde:

- C: es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.
- C_i : es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.
- $P(C_i)$: es una probabilidad.
- $C \in C_i$: representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i .

Este factor tiene en cuenta el número de conjuntos mínimos de fallos en que aparece un componente (frecuencia de aparición en el árbol); su probabilidad y la de los componentes a los cuales va asociado.

Las medidas de importancia RAW y RRW son las más utilizadas porque su significado es más directo: se expresan en términos de porcentaje de mejora o empeoramiento de la probabilidad del TOP.

Por último, cabe tener en cuenta que también existen medidas de importancia respecto de los conjuntos mínimos de fallos.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

La técnica, por su grado de elaboración, se aplica a sucesos relativamente complejos para los cuales no es posible la obtención directa de la frecuencia.

Estos sucesos se han de poder descomponer en sucesos más sencillos.

RECURSOS NECESARIOS

RECURSOS HUMANOS

La técnica es relativamente compleja y tiene que ser aplicada por un analista con una preparación adecuada en el uso del método. Requiere normalmente un proceso de revisión por un tercero si se quiere garantizar la calidad del estudio (por sus características se presta a interpretaciones distintas de los análisis, si no se fijan claramente los supuestos y criterios antes del estudio). También es necesario considerar una importante dedicación para la determinación de las tasas de fallos de los componentes.

Para un árbol de fallos de unos 50 componentes se podría considerar las siguientes actividades:

- Estudio de sistema (dos días de dedicación).
- Elaboración del árbol (un día)

Estas dos fases requieren para el analista el apoyo de todas las personas que más conocen el área de la instalación y su operación: personal de producción, mantenimiento, operadores, instrumentistas, etc.

- Determinación de las frecuencias (un día)
- Cuantificación del árbol mediante ordenador (4 horas).
- Estudio de resultados (dos días).
- Propuestas de mejora (4 horas).
- Reelaboración del árbol incluyendo mejoras y evaluación (dos días y medio).

Es decir, un total de unas 76 horas de dedicación de un analista experto, pudiendo variar esta estimación en función de la complejidad del sistema, de la experiencia anterior del analista en cuanto al tipo del sistema y por último, del grado de detalle que se persiga en el estudio.

RECURSOS MATERIALES

La técnica del árbol de fallos es relativamente detallada y requiere un excelente conocimiento del sistema. Desde el punto de vista de documentación se requerirá toda la disponible: desde los diagramas de tuberías e instrumentación hasta los procedimientos de

operación/mantenimiento seguidos y los detalles de diseño de cada elemento, ya que el árbol de fallos incorpora multitud de aspectos.

Soportes informáticos

Para los árboles con un número de componentes no muy elevado el esfuerzo de evaluación exige el uso de un programa de evaluación de árboles de fallos. En la tabla 1.7 se reseñan algunos de los códigos existentes.

TABLA 1.7 CODIGOS DE CALCULO DE ÁRBOLES DE FALLOS

Código	Características
<p>Análisis cualitativo : PREP, 1970; ELRAFT, 1971; MOCUS,1972; TREEL, MICSUP, 1975; ALLCUTS, 1975; SET, 1974; FTAP, 1978</p> <p>Análisis cualitativo: KITT1, KITT2, 1970; SAMPLE, MOCARS, 1977; FRANTIC, 1977</p> <p>Evaluación directa: ARMM, 1965; SAFTE, 1968; GO, 1968; GO FAULT FINDER, 1977; NOTED, 1971; PATREC, 1974; PATREC-MC, 1977; BAM, 1975; WAM-BAM, 1976; WAM-CUT, 1978.</p> <p>Uso doble: PL-MOD, 1977</p> <p>Otros: SALP-PC, 19: MODULE, 1988; CARA, 1988; etc.</p>	<p>Calculan los conjuntos mínimos de fallos o caminos de éxito.</p> <p>Realizan el calculo probabilistico sobre la base de los conjuntos mínimos de fallos.</p> <p>Realizan la evaluación numérica directa sin calcular previamente todos los conjuntos mínimos de fallos.</p>

Se distinguen básicamente en su forma de resolución de árbol de fallos.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

VENTAJAS

1. La técnica estudia las causas de los sucesos indeseados y permite evidenciar los puntos débiles de un sistema (conjunto mínimo de fallos). Este aspecto es fundamental en materia de prevención de accidentes.
2. A través del análisis de importancia se conoce el peso relativo de los distintos elementos del sistema. Con ello se puede establecer una lista de prioridades a fijar para mejorar la instalación.
3. La técnica es un método para conocer a fondo un sistema.

INCONVENIENTES

1. No permite tratar directamente fallos dependientes, al menos de forma directa, aunque siempre sea posible añadir el fallo dependiente como un componente más del árbol
2. Sólo permite el tratamiento de situaciones temporales homogéneas.
3. El resultado calculado presenta una incertidumbre asociada a la que pesa sobre los componentes básicos, a los posibles errores en la construcción o debido a criterios dispares de los analistas

1.4.2 MÉTODO DEL ÁRBOL DE SUCESOS

DESCRIPCIÓN

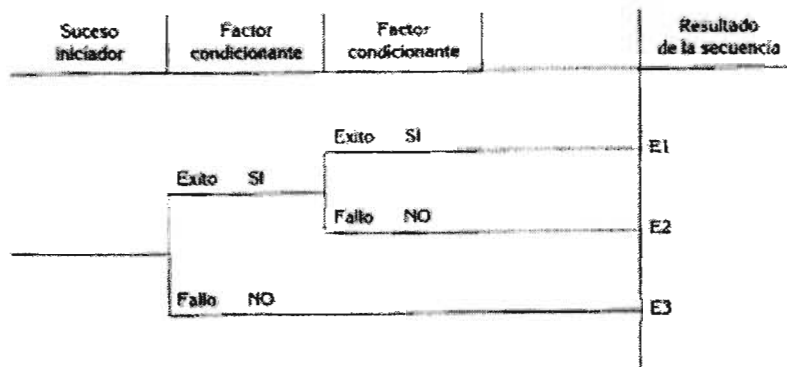
El árbol de sucesos o análisis de secuencias de sucesos es un método inductivo que describe la evolución de un suceso iniciador sobre la base de la respuesta de distintos sistemas tecnológicos o condiciones externas.

Partiendo del suceso iniciador y considerando los factores condicionantes involucrados, el árbol describe las secuencias accidentales que conducen a distintos eventos.

A) CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantea sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo (ver figura 1.10)

FIGURA 1.10 ESQUEMA GENERAL DE UN ARBOL DE SUCESOS



Se obtiene así 2^N combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias.

La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente si bien este criterio es difícil de aplicar en algunos casos.

B) EVALUACIÓN DEL ÁRBOL

El árbol de sucesos así definido tiene las siguientes características:

- El suceso iniciador viene determinado por una frecuencia (f), expresada normalmente en ocasiones por año.
- Los N factores condicionantes son sucesos definidos por su probabilidad de ocurrencia: p_i , $i=1,N$.
- Los sucesos complementarios de estos tienen asociados una probabilidad de $1-p_i$, $i=1,N$.

Como se considera que los factores condicionantes son sucesos independientes, cada una de las secuencias s , tienen asociada una frecuencia, f , de:

$$f_s = f \cdot \prod_{i=1}^{N_j} p_i \cdot (1 - p_j) \quad i = 1, N_j = 1, n_j$$

siendo:

N_j : el número de sucesos de éxito de la secuencia s .
 N_j : el número de sucesos de fallo de la secuencia s .

De esta forma también se cumple que la suma de las frecuencias de todas las secuencias accidentales es igual a la frecuencia del iniciador:

$$\sum f_s = f$$

La obtención de los valores p_i se basa generalmente en datos bibliográficos, estimaciones de expertos o en la aplicación de la técnica del árbol de fallos descrita en el apartado anterior.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

La técnica se utiliza con especial énfasis para describir la evolución de fugas de productos según sus características y el entorno en el cual tienen lugar.

RECURSOS NECESARIOS

El uso de un código de ordenador se recomienda en el caso en que el número de sistemas y componentes sea muy elevado y se quiera llevar a cabo un estudio de los conjuntos mínimos de las secuencias accidentales (básicamente si existen dependencias funcionales en la estructura).

VENTAJAS / INCONVENIENTES

VENTAJAS

1. Permite un estudio sistemático y exhaustivo de la evolución de un suceso.
2. Su aplicación es muy sencilla.

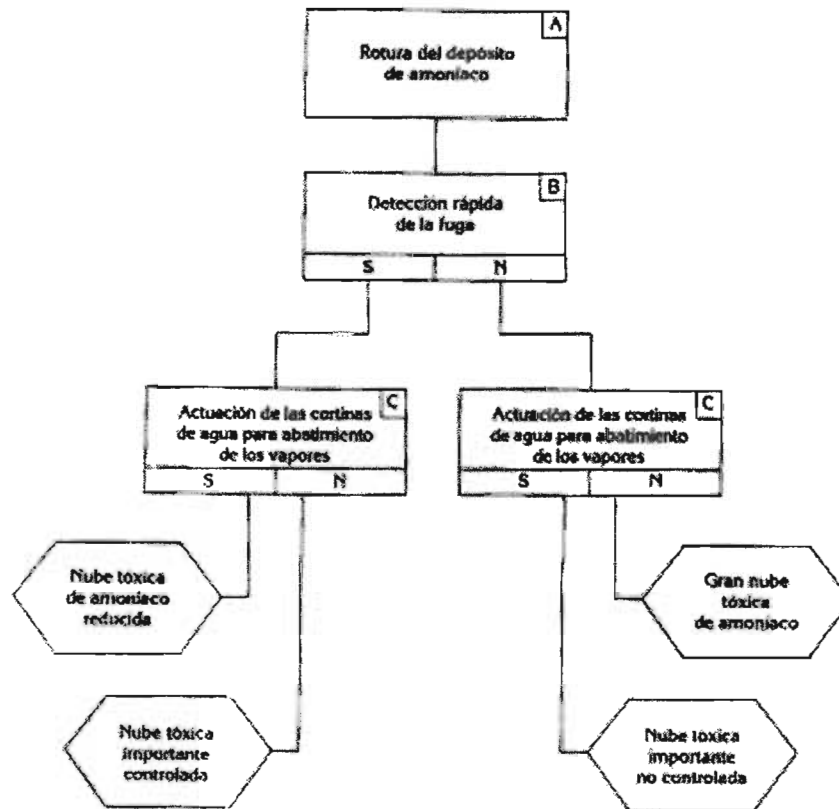
INCONVENIENTES

1. El valor obtenido está sujeto a incertidumbre por la dificultad que existe normalmente en evaluar las probabilidades de los factores asociados.
2. Si el árbol es grande su tratamiento puede hacerse laborioso.

1.4.3 MÉTODO DEL ANÁLISIS DE CAUSAS – CONSECUENCIAS

Esta técnica integra los métodos del árbol de fallos y sucesos en una sola estructura, siendo válidos los principios expuestos para estos métodos.

Por ejemplo en el caso de la rotura de un tanque de amoníaco el diagrama correspondiente sería reseñado a continuación



El suceso A es el calculado a través del árbol de fallos ya descrito. La evolución del accidente considera básicamente dos factores.

- Detección (suceso B).
- Actuación de las cortinas de agua (suceso C).

Según la secuencia la fuga de amoníaco reviste mayor o menor gravedad, tal como se indica en los sucesos finales descritos en los rombos.

1.4.4 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL FALLO DE MODO COMÚN

DESCRIPCIÓN

Quando se produce el fallo simultáneo de dos componentes este puede ser debido a dos causas:

- Fallo simultáneo de los dos pero sin que haya ninguna relación entre ambos fallos (sucesos independientes). Este tipo de fallos que contemplan las dos técnicas descritas en los anteriores apartados.
- Fallo simultáneo de los dos al existir una relación entre ambos (sucesos dependientes).

Los fallos dependientes o también denominados de causa o de modo común merecen un estudio específico porque no son contemplados directamente en otras técnicas y porque representa una parte importante de fallos que se producen normalmente.

A) CLASIFICACIÓN DE LOS FALLOS DE CAUSA COMUN

Se consideran normalmente tres tipos de dependencia entre componentes: fallos por dependencias funcionales, fallos secundarios o fallos por dependencia de fabricación u operación.

Fallos por dependencias funcionales: Estas dependencias son debidas a componentes, subsistemas compartidos. Es el caso por ejemplo de un suministro de un suministro eléctrico o de aire de instrumento cuyos fallos pueden provocar el fallo de varios componentes. Si el árbol de fallos ha contemplado los servicios en los fallos de componentes básicos, este fallo de modo común será identificado y contabilizado. Si no, quedará enmascarado esta causa subestimándose la probabilidad del TOP

Fallos secundarios: En este caso se agrupan los fallos de componentes cuyas consecuencias pueden ser el fallo de otro. Sería, por ejemplo, el caso de la rotura de una tubería que causará la rotura de otra muy cercana. Como es el caso anterior, este tipo de dependencia puede ser incluido en el árbol de fallos siempre y cuando el analista lo haya identificado pero de forma más artificiosa.

Fallos por dependencia de fabricación u operación: Componentes manufacturados por un mismo fabricante puede presentar similitud de comportamiento en cuanto a fallo. En este caso existen una serie de técnicas para evaluar o al menos acotar estas dependencias.

B) TÉCNICAS DE EVALUACIÓN

Acotaciones de la dependencia: La técnica consiste en calcular las cotas máximas y mínimas de dependencia entre dos componentes sobre la base e las probabilidades respectivas de los sucesos. La probabilidad de la ocurrencia simultánea de dos suceso A y B es la de su intersección ($A \cap B$). Esta probabilidad, en el caso de total independencia de los sucesos es igual al producto de las probabilidades, que define, por tanto, una cota inferior. La cota superior de A B puede ser definida como el minimo entre ambas probabilidades, de esta forma se puede considerar que:

$$p(A) \cdot p(B) \leq p(A \cap B) \leq \min \{p(A), p(B)\}$$

Este intervalo es correcto siempre y cuando se pueda suponer que las probabilidades respectivas de cada suceso sean totales (es decir que incluyan las dependencias).

Acoplamiento: Es una variante del caso anterior pero considerando diferentes grados de dependencia o niveles de acoplamiento (ninguno, medio, fuerte, total).

Ambas técnicas fueron utilizadas en el estudio WASH-1400

Método del factor β : Este método considera que la tasa de fallos total (λ) de un componente puede descomponerse en dos contribuciones: (λ_1) la tasa de fallos independientes y (λ_2) la tasa de fallos de causa común. Se define al factor β como el cociente entre la tasa de fallos de un componente correspondiente a fallos de causa común y la tasa de fallos global. De esta forma: $\beta = \lambda_1 / \lambda$.

Se puede deducir entonces, la probabilidad de fallo conjunto de dos elementos en función del valor de β .

La fiabilidad de un sistema de dos componentes en paralelo que pueden fallar tanto por fallos dependientes como independientes se expresa como la probabilidad de que no fallen por mecanismos independientes (p_1) ni por mecanismos dependientes (p_2), es decir:

$$(p_1) \cdot (p_2)$$

La probabilidad de no fallo independientes es la de la unión de los sucesos no fallo A o no fallo B que se puede expresar como:

$$p(A \cup B)$$

suponiendo que ambos tienen una tasa de fallos constante e igual divididos en dos contribuciones:

λ_1 : tasa de fallos independientes

λ_2 : tasa de fallos dependientes.

La probabilidad de no fallo por mecanismos dependientes se expresa como:

$$p^2 = e^{-\lambda_2 t}$$

Luego la probabilidad de no fallo del sistema es:

$$p_1 \cdot p_2 = (2e^{-\lambda_1 t} + e^{-2\lambda_1 t}) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

Por otra parte siendo $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ y $\beta = \lambda_2 / \lambda$ se pueden expresar λ_1 y λ_2 en función de

$$\lambda_1 = (1 - \beta)\lambda$$

$$\lambda_2 = \beta\lambda$$

Substituyendo se obtiene:

$$p_1 \cdot p_2 = [2e^{-\lambda t} - e^{-(2 - \beta)\lambda t}]$$

De donde se deduce que su in fiabilidad es:

$$1 - p_1 p_2 = 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-(2 - \beta)\lambda t} \quad (1)$$

En el caso en que $\beta = 1$ se obtiene la expresión ya conocida del fallo de un componente ($1 - e^{-\lambda t}$), ya que entonces la probabilidad de fallo del otro es 1.

La dificultad del método consiste en determinar los valores de la β , aunque se puede estimar.

Existen programas de cálculo que permiten calcular el fallo de modo común; entre otros se pueden citar COMCAN, BACKFIRE y SETS.

1.4.5 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

Se han descrito en el apartado del árbol de fallos, los principales factores de importancia que permiten poner de manifiesto en una estructuras compleja, cuando tiene numerosos componentes, cuales son los elementos que por su elevada probabilidad, su repetición en la estructura o su situación son decisivos para la ocurrencia del suceso estudiado.

Conviene destacar que este tipo de estudio resulta a menudo fructífero por las siguientes razones:

- Se identifican los elementos esenciales de un sistema.
- Se determinan aquellos componentes cuya mejora puede suponer un aumento sustancial para todo el sistema.
- A la inversa, se identifican aquellos para los cuales no es imprescindible un aumento de fiabilidad.
- Permiten también un análisis crítico sobre los resultados obtenidos que pueden evidenciar errores en el árbol o en la selección de las tasas de fallos.

La propuesta de mejoras en el sistema se basa normalmente sobre el análisis de importancia.

En este sentido se recomienda su uso, incluyendo también el árbol de sucesos.

1.4.6 RESUMEN

En este apartado se ha expuesto la determinación de la frecuencia de sucesos complejos. En la tabla 1.9 se agrupa para cada una de las técnicas descritas, sus características, el ámbito de aplicación, los recursos necesarios así como las ventajas e inconvenientes de su aplicación resumiendo el contenido de los correspondientes apartados.

TABLA 1.9 RESUMEN DE TECNICAS PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

Técnica	Características	Ambito de aplicación	Recursos	Soportes Informaticos	Ventajas / Inconvenientes
Arbol de fallos	<ul style="list-style-type: none"> * Técnica deductiva de descomposición. * Cualitativa : a través de los conjuntos minimos de fallos. *Factores de importancia * Análisis de incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> * Determinación de sucesos complejos. * Estudio del impacto de mejoras en un sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> *Buen conocimiento del método * Buen conocimiento del sistema estudiado. * Documentación: toda disponible *Datos necesarios probabilidades de fallo de los componentes 	<ul style="list-style-type: none"> * El uso de la técnica requiere de un programa de cálculo apropiado. * Existen numerosos 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> *Estudio profundo del sistema. * Base para toma de decisiones. <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Laborioso. * Incertidumbre de los resultados. * Dependiente de los criterios adoptados
Arbol de sucesos	<ul style="list-style-type: none"> * Técnica inductiva * Cualitativa. * Cuantitativa. 	<ul style="list-style-type: none"> * Detreminación de la evolución de un iniciador 	<ul style="list-style-type: none"> * Buen conocimiento de los fenómenos físicos implicados. * Datos necesarios: frecuencia de los iniciadores y probabilidades de los sucesos condicionantes. 	<ul style="list-style-type: none"> * Normalmente no requiere el uso de un programa de cálculo. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Uso muy sencillo * Sistematiza la evolución de un suceso. <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Incertidumbre de resultados numericos.
<p>Análisis de causa - consecuencia</p> <p>Para la determinación del fallo de modo común</p>	<p>Combina las características de los anteriores métodos.</p> <ul style="list-style-type: none"> * Existen varias técnicas de características distintas (factor Bg, acotación de las dependencias, acoplamiento) 	<ul style="list-style-type: none"> * Determinación de los fallos dependientes 	<ul style="list-style-type: none"> * Buen conocimiento del método * Datos necesarios: Factor β 	<ul style="list-style-type: none"> * Existen programas de soporte 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Importancia real de los fallos dependientes <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Dificultad para obtener datos * Incertidumbre asociado a los resultados numéricos

Conviene destacar que las dos primeras técnicas se utilizan muy frecuentemente de forma complementaria: el árbol de sucesos describe la evolución de un suceso cuya frecuencia ha sido calculada mediante un árbol de fallos.

Alternativamente el método de las causas – consecuencias integra directamente las dos técnicas en único modelo.

Por último, la determinación de los fallos dependientes, que suele representar una parte importante de los fallos, no se puede determinar de forma directa mediante las anteriores técnicas que requieren datos concretos, a menudo difíciles de conseguir y que suelen ofrecer con frecuencia resultados dispares.

2. METODOS PARA EL CALCULO DE LOS ALCANCES DE DETERMINADOS EFECTOS.

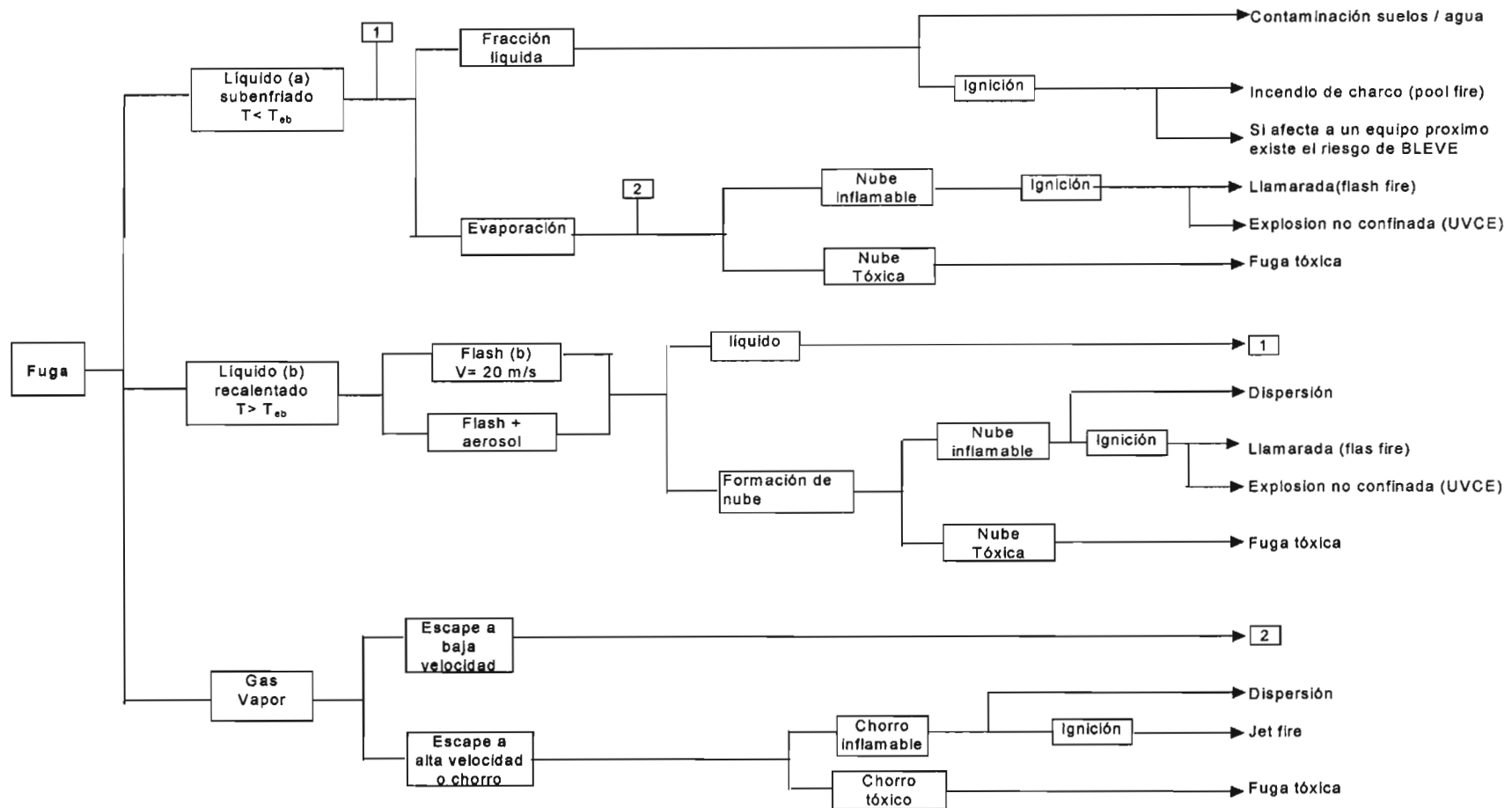
Se indican únicamente en este documento las líneas generales de esta fase de un análisis de riesgos.

Esta fase de los análisis de riesgos es relativamente compleja ya que tiene que simular el comportamiento real de una sustancia química en el cual intervienen multitud de factores:

- Condiciones en que se produce la liberación de la sustancia.
- Características físico –químicas de la misma.
- Características del medio en el cual se produce la dispersión.
- Interrelación entre la sustancia y el medio.

En la figura 2.1 se muestra de manera general la evolución de una fuga según sus características.

FIGURA 2.1 EVOLUCIÓN DE LA FUGA DE UN FLUIDO



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

Las especificaciones mínimas que deberían cumplir esta fase, son:

- Deberá dejarse clara constancia de las condiciones de cálculo consideradas (caudales de fuga, variables meteorológicas, valores umbrales adoptados)
- Deberá darse una estimación de la incertidumbre o rango aproximado del resultado obtenido. En este caso es el asociado al cálculo de las áreas.
- Deberán contabilizarse todos los efectos posibles del accidente con especial incidencia sobre los más graves.
- Para efectos que evolucionan en función del tiempo (radiación térmica, concentraciones tóxicas) deberían tenerse en cuenta también los tiempos

Para ello será necesario disponer de los siguientes datos:

- Ecuaciones sencillas para el cálculo de los efectos de los accidentes.
- Lista de los programas disponibles en el mercado con sus principales características y campos de aplicación para cada uno de los cálculos referenciados en la tabla, así como las pruebas experimentales a las que han sido sometidos.
- Criterios básicos a seguir para cada uno de los efectos (radiación, sobrepresión, concentraciones máximas tóxicas).

TABLA 2.1 MODELOS DE CALCULO DEL ALCANCE DE DETERMINADOS EFECTOS

1. Modelos de cálculo de fugas y derrames:

- 1.1 Gases y vapores.
- 1.2 Líquidos.
- 1.3 Bifásicos.

2. Modelos de cálculo de áreas de charco:

- 2.1 Líquidos.
- 2.2 Gases licuados.
- 2.3 Charcos incendiados.

3. Modelos de cálculo de evaporación:

- 3.1 Líquidos evaporantes.
- 3.2 Gases licuados.

4. Modelos de cálculo de dispersión:

- 4.1 Dispersión de chorro turbulento de gases y vapores.
- 4.2 Dispersión de gases neutros y ligeros a baja velocidad.
- 4.3 Dispersión de gases pesados a baja velocidad.

5. Modelos de cálculo de explosiones:

5.1 Explosiones confinadas.

- 5.1.1 Explosiones físicas
- 5.1.2 Explosiones químicas
 - De mezclas inflamables de gases
 - De mezclas inflamables de polvo.
 - De reacciones fuera de control

5.2 Explosiones semiconfinadas.

5.3 Explosiones no confinadas.

5.4 Alcance de fragmentos

6. Modelo de calculo de radiación térmica.

7. Casos singulares:

7.1 BLEVE.

7.2 Boil over.

7.3 Roll over.

3. METODOS PARA EL CALCULO DE DAÑOS.

En este documento, se describen las líneas generales de esta fase de un análisis de riesgos.

El calculo de daños e aplica posteriormente al cálculo del alcance de los efectos y tiene por objeto analizar la agresión del accidente sobre el medio que rodea a la instalación.

Las especificaciones mínimas que debería cumplir tal cálculo y son:

- Se estudiarán los efectos sobre las personas, analizando las distancias correspondientes a las zonas de intervención, alerta y alcances de 1%, 50% y 99% de letalidad y otros daños físicos..
- Se calcularán los efectos sobre las instalaciones analizando las distancias correspondientes al umbral de daños reparables y destrucción total. En este apartado, se estudiará la posibilidad de que el accidente estudiado, genere un efecto sinérgico o efecto dominó sobre los equipos vecinos.
- Se determinará el efecto sobre el medio ambiente, analizando el impacto que, sobre la atmósfera, sobre las aguas, sobre el terreno y sobre los biotopos locales tiene un accidente mayor de carácter estocástico.
- Deberá darse una estimación de la incertidumbre o rango aproximado del resultado obtenido. En este caso es el asociado al cálculo de las áreas letales, a las ecuaciones de Probit, a la evaluación de las poblaciones afectadas,
- El cálculo de víctimas deberá ponderar con sus respectivas probabilidades las distintas condiciones meteorológicas posibles en la zona.

Para ello será necesario contar con los siguientes datos:

- Ecuaciones de PROBIT (*PROB*ability *UNIT*), disponibles para distintos productos y efectos.
- Resultados del estudio de comparación entre las distintas ecuaciones.
- Umbrales / criterios a considerar para los daños materiales y al medio ambiente.

4. METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO.

4.1 CONCEPTOS GENERALES

Una de las finalidades de un análisis Cuantitativo de Riesgos consiste en evaluar el riesgo asociado a la instalación en estudio. Existen distintas definiciones del riesgo que responden a distintos conceptos.

En este capítulo se definen estos conceptos y se indica como calcularlos. Por último, se reflejan algunos criterios de aceptabilidad.

4.1.1 RIESGO GLOBAL E INDIVIDUAL

Como consecuencia del estudio, se obtiene una lista de hipótesis de accidentes definidas a través del par:

- Frecuencias (ocurrencia / año)
- Daño (víctimas / ocurrencia)

Riesgo global (RG). Se define como la suma de los riesgos asociados a cada una de las hipótesis de accidentes.

Riesgo individual. La definición que da el ICE (*Institution of Chemical Engineers*) es: "frecuencia a la cual un individuo puede esperar un determinado nivel de daño como consecuencia de la ocurrencia de un determinado suceso accidental."

En otras palabras, se define como la frecuencia que tiene una persona de recibir un cierto daño.

Ejemplo: Riesgo individual de morir en un accidente de carretera. Se admite que es aproximadamente 10^{-4} / año.

La persona puede ser un empleado de la instalación que genera el accidente, un miembro de población vecinas o un usuario de una instalación de recreo situada en un punto determinado del entorno de la misma.

Es necesario tener cuidado en el uso del riesgo individual para representar individuos "medios" o "típicos".

En realidad hay una amplia gama de posibles valores que reflejan una amplia variación en las costumbres de las personas y su vulnerabilidad frente a un daño. Cualquier criterio de riesgo deberá de tomar en consideración estos aspectos. Por ejemplo, en unas viviendas, los grupos más expuestos son probablemente los núcleos familiares con niños pequeños que pasan gran parte del día en casa. Esta situación puede conducir a hacer la hipótesis de que un ocupante de estas viviendas está presente en un 100% de los casos.

4.1.2 RIESGO SOCIAL

El ICE (*Institution of Chemical Engineers*) lo define como: «La relación entre la frecuencia y el número de personas que sufren un cierto nivel de daño en una población dada, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado suceso accidental».

Este concepto se relaciona con la posibilidad de un desastre debido a la proximidad de poblaciones con respecto de un accidente mayor.

En este caso el riesgo se expresa en sus dos términos: tamaño del desastre y probabilidad del mismo. Puede haber una baja probabilidad de dañar a la mayoría de los habitantes de una vivienda y una probabilidad mayor de dañar unos cuantos, para el mismo accidente mayor.

Un ejemplo de actividad que se mide con el riesgo social es el transporte aéreo.

Estos desastres causan protestas y conmociones en todo un país, seguidos de investigaciones detalladas para averiguar sus causas y peticiones para que medidas generales sean tomadas para reducir este tipo de riesgo.

4.1.3 RIESGO DE MUERTE Y DAÑOS

A menudo se asume que el criterio de riesgo para accidentes mayores debería de estar relacionado con la probabilidad de muerte.

Esto es más directo y más fácilmente comparable con otros riesgos de la vida diaria.

Ahora bien, existen dos dificultades relacionadas con el criterio de riesgo letal:

- La sociedad tiene en general igual de interés con respecto de los riesgos de heridas graves u otros daños, que con el riesgo de muerte.
- Existen dificultades técnicas en calcular los riesgos de muerte para un peligro determinado ya que la población expuesta tiene una amplia gama de variación en cuanto a sensibilidad al daño.

Con respecto del segundo punto, si bien existen ecuaciones de Probit que permiten relacionar las proporciones de personas afectadas para un determinado nivel de daños, estas están sujetas a incertidumbre.

Por otra parte tomar un representante "medio" de la población o "el más expuesto" puede ser cuestionable.

En este sentido el HSE (*Health and Safety Executive*) define la dosis "peligrosas" como la dosis tóxica de un gas, radiación térmica y sobrepresión de la explosión que provoca los siguientes efectos:

- Efectos importantes en prácticamente todas las personas expuestas.
- Una fracción importante requiere atención médica.
- Algunas personas están seriamente heridas, requiriendo tratamiento prolongado.
- Personas altamente vulnerables pueden morir.

4.1.4 OTROS CONCEPTOS

Existen otros conceptos relacionados con el riesgo que se suelen utilizar en los Análisis Cuantitativos de Riesgos.

FAR (Fatal Accident Rate): Se define como el número de accidentes mortales en un grupo de 1000 personas en su vida laboral (10^8 horas).

Según Kletz, 1986 el FAR de la industria química es de 4, que se puede descomponer en dos contribuciones:

- Riesgos convencionales (caídas, ...) 2
- Riesgos químicos 2

Se considera que en una planta típica existen 5 tipos de riesgos químicos por lo que uno en particular no debería suponer un FAR superior a 0.4.

En la tabla que sigue se reseñan algunos valores de FAR correspondientes a algunos tipos de actividades industriales.

Actividad	FAR
Industria de la confección	0,15
Permanecer en casa	1,0
Industria del automóvil	1,3
Industria de la madera	3,0
Industria química británica	4,0
Industria mecánica	7,0
Agricultura	10,0
Minería	12,0
Industria pesquera	35,0
Construcción	64,0

Riesgo residual: Según ICE (*Institution of Chemical Engineers*) es el riesgo que presenta una instalación tras la incorporación de las mejoras evidenciadas por el estudio realizado.

4.2 CALCULO DEL RIESGO

Riesgo Global: Su expresión matemática es:

$$RG = \sum_{i=1}^N f_i V_i$$

f_i : frecuencia de i-ésimo suceso de accidente

V_i : víctimas asociadas al i-ésimo suceso.

Según se consideren las víctimas en el interior / exterior de la instalación se obtiene el riesgo global interior / exterior.

Riesgo individual: Una expresión del riesgo individual es la obtenida a través de las curvas de isorriesgo.

Una expresión promedio de este riesgo se puede obtener a partir del riesgo global, de la siguiente manera:

$$R_i = \frac{RG}{N_e}$$

Donde RG es el riesgo global, N_e el número de personas expuestas.

En el caso de una instalación cabe distinguir entre el riesgo individual del personal de la instalación y el asociado a las poblaciones vecinas.

En este sentido N_e representaría el número de personas de la planta o el correspondiente a las poblaciones vecinas.

La determinación del número medio de personas expuestas suele ser difícil de realizar, sobre todo para el riesgo individual del personal de la planta. El estudio Rijnmond sugiere adoptar:

$$\frac{(5ND + 16NN) \times 52}{5 \times 47}$$

Donde:

- Se consideran 5 turnos de trabajo de 8 horas (de 6 a 14 en jornada normal con una interrupción de una hora, segundo turno de 14 a 22 horas tercer turno de 22 a 6 horas) y dos de descanso.
- ND número de personas presentes durante la jornada normal (primer turno). A lo largo de una semana son ND personas x 5 primeros turnos. Total: ND personas x 5 periodos de 8 horas.
- NN número de personas presentes durante el resto de la jornada (segundo y tercer turno). A lo largo de una semana son:

NN personas x 7 segundos turnos.

NN personas x terceros turnos.

En total: NN personas x 16 periodos de 8 horas.

- 52 número total de semanas sobre un año.
- 25 (5ND + 16NN) número total de personas presentes acumuladas sobre un año por periodo de 8 horas.
- 47 número total de semanas trabajadas al año (descontando vacaciones y ausencias por enfermedad).
- 47 x 5 número total real de periodos de 8 horas al año.

Riesgo social: Se representa a través de las curvas F – N: en abscisas se indica el número de víctimas N (normalmente con una escala logarítmica) en ordenadas la frecuencia F de que se produzcan N o más muertes.

4.3 CURVAS DE ISORIESGO

Las curvas de isoriesgo constituyen una representación gráfica del riesgo individual. A cada punto del entorno se asocia la frecuencia de muerte que tendría una persona situada en este

punto. Según el tipo de daño que puede causar la muerte el cálculo es distinto. Posteriormente se unen a través de curvas los puntos que presentan un riesgo idéntico.

Fuga tóxica: en este caso se calcula la frecuencia de muerte en un punto dado como el producto de:

- Probabilidad de que el viento sople en la dirección del punto.
- Probabilidad de que se dé una determinada categoría de estabilidad.
- Probabilidad de que la dosis acumulada en el punto cause la muerte (ecuación de probit)
- Frecuencia del accidente.

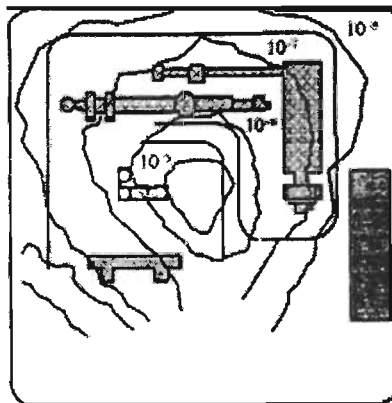
Radiación térmica / sobrepresión: En este caso corresponde a :

- Probabilidad de que la radiación / sobrepresión provoque la muerte.
- Frecuencia del accidente.

El cálculo de las curvas de isoriesgo se relativamente laborioso y normalmente se recurre al uso de un programa.

Son numerosos los programas que permiten realizar estos cálculos, entre otros se pueden citar: RISK CURVES, ISORIESGO, etc.

FIGURA 4.1 EJEMPLO DE CURVAS DE ISORIESGO



4.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DETERMINACIÓN DEL RIESGO

La determinación del riesgo correspondiente a métodos cualitativos consiste en la contraposición de los valores (bien sean índices o rangos cualitativos) obtenidos para la probabilidad y para la severidad de las consecuencias en un cuadro parecido al reseñado en las figuras 4.2 / I y 4.2 / II

FIGURA 4.2 // DEFINICION DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA SEGUN EL RMPP (1)

I. Baja:	Ocurrencia considerada <i>improbable</i> durante la vida media de la planta, en condiciones normales de operación y mantenimiento.
II Media	Ocurrencia considerada <i>posible</i> durante la vida media de la instalación
III Alta	Probabilidad de ocurrencia suficientemente alta como para poder suponer que el suceso <i>ocurrirá</i> al menos una vez durante la vida media de la instalación.
(1) <i>Risk Management and Prevention Program</i> (USA).	

FIGURA 4.2 // II DEFINICION DE SEVERIDAD DE CONSECUENCIAS SEGUN EL RMPP (1)

I. Baja:	Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones despreciables. Cabe esperar lesiones para exposiciones largas o individuos con condiciones de salud susceptibles de crear complicaciones.
II. Media	Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones suficientes para causar lesiones serias y/o muertes si no se toman medidas correctivas efectivas con rapidez.
III Alta	Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones suficientes para causar lesiones serias y/o muertes por exposición. Cabe esperar que un elevado número de personas serán afectadas.
(1) <i>Risk Management and Prevention Program</i> (USA).	

Los criterios de aceptabilidad delimitaran las zonas para las cuales se requiere un estudio más profundo y la adaptación de medidas de prevención / mitigación.

4.5 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Las decisiones con respecto de la aceptabilidad de un riesgo dependen de los riesgos individual y social, aunque existen en general más criterios basados en el riesgo individual, que en el social.

Riesgo individual: Tanto el RSSG (*Royal Society Study Group*) que se publicó en 1983 un estudio sobre el riesgo, la evaluación del (*Risk Assessment*), como el HSE (*Health and Safety Executive*), proponen como riesgo individual intolerable 10^{-3} / año, incluso si la persona expuesta considera que, de su exposición, se desprende un beneficio importante (por ejemplo un trabajo o una actividad lúdica).

Un riesgo de 10^{-6} / año y en algunas circunstancias 10^{-5} / año deberían de considerarse como aceptable por ser trivial, en todo tipo de circunstancias.

Entre ambos niveles debería de exigirse la implantación de las medidas preventivas o de mitigación que reduzcan el riesgo.

Riesgo Social: El riesgo individual es a menudo una condición insuficiente. Existe una aversión por parte de la sociedad a la probabilidad, aunque pequeña, de que un accidente pueda provocar un número importante de muertes. Por otra parte el riesgo individual puede cumplir con los criterios de aceptabilidad, aún cuando exista un riesgo social alto. Un ejemplo extremo

sería un hospital situado cerca de una instalación con peligro de accidente mayor. Las personas situadas de forma permanente en el edificio estarían expuestas a un riesgo relativamente alto, pero pacientes individuales, presentes durante un corto período de tiempo, tendrán un incremento de riesgo individual muy pequeño en promedio sobre todo un año.

El RSSG (*Royal Society Study Group*) no sugiere ningún valor máximo para el riesgo social, mientras que el ACMH (*Advisory Comité on Major Hazards*) indica que cualquier accidente grave en una instalación no nuclear que implicaría 10 o más muertes debería tener una probabilidad menor de 10^{-4} por año, aunque se considera que $2 \cdot 10^{-4}$ podría ser el umbral de riesgo social tolerable.

Para accidentes capaces de causar más víctimas mortales, se indica que el riesgo de provocar entre 500 – 1000 muertos en un accidente no nuclear debería de ser menor de 10^{-3} e incluso menor de $2 \cdot 10^{-4}$ por año, en situaciones en las cuales las probabilidades de elección son escasas, aunque cuando existan la probabilidad de elegir si someterse o no al riesgo, se podría fijar un valor mayor.

SEGUNDA PARTE
METODOS CUALITATIVOS PARA EL
ANÁLISIS DE RIESGO



ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

1 METODOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS QUÍMICOS

1.1 METODOS CUALITATIVOS

1.1.1 ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES

DESCRIPCIÓN

Consiste en estudiar los accidentes registrados en el pasado en plantas similares idénticos o de la misma naturaleza.

Se basa en información de procedencia diversa:

- Bibliografía especializada (publicaciones periódicas y libros de consulta)
- Bancos de datos de accidentes informatizados.
- Registro de accidentes de la propia empresa, de asociaciones empresariales o de las autoridades competentes.
- Informes o peritaje realizados normalmente sobre los accidentes más importantes

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 los accidentes:
 - Errores humanos.
 - Fallo 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.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

- Aplicación útil principalmente para el establecimiento de posibles riesgos en una instalación.
- Puede ser de utilidad para hacer una aproximación cuantitativa de la frecuencia de determinados tipos de accidentes, en caso de disponerse de una base estadística suficientemente representativa.
- De especial utilidad cuando se aplica a procesos y productos de utilización masiva o frecuente (productos energéticos, productos químicos de base).
- Los resultados obtenidos depende mucho de la calidad y de la información disponible en las fuentes de información consultadas.

RECURSOS NECESARIOS

Esta técnica relativamente poco costosa dentro del campo del análisis de riesgo. El proceso consta de la consulta a la fuente o fuentes de información seleccionadas y posteriormente un trabajo de selección y elaboración estadística de los resultados obtenidos.

Soportes informáticos

Entre los principales bancos de datos de accidentes industriales se pueden citar OSIRIS-1, OSIRIS-2, FACTS, MHIDAS (Major Hazards Incident Data Service) y el banco de datos desarrollados por el Centro de Investigación de la CEE de ISPRA: MARS (Major Accident Reporting System). En principio, todos ellos recogen los accidentes ocurridos en cualquier país del mundo, si bien cada banco ofrece normalmente mayor número de accidentes sobre su propio país, por la lógica mayor facilidad en cuanto a obtención de datos. Sus características se reseñan en la tabla 1.1.

TABLA 1.1 METODO DEL ANALISIS HISTORICO. BANCOS DE DATOS DE ACCIDENTES

Banco de accidentes	Número de casos registrados Períodos	Accidentes	Procedencia de los datos	Observaciones
OSIRIS 1	3000 (1970 – 1990)	Con sustancias peligrosas, incluye: Transporte, instalaciones	General	País: Italia Consulta y respuesta por fax disquete magnético Idioma: ingles
OSIRIS 2	2500 (1977 – 1992)	Con hidrocarburos	Oil Spill Intelligence Report que recopila todos los casos ocurridos en el mundo	País : Italia Consulta y respuesta por fax disquete magnético Actualizado anualmente Idioma: ingles
MHIDAS	5330 (de forma continua desde 1985 recopilación de datos desde 1966 y algunos importantes anteriores a la fecha)	Con sustancias peligrosas incluye: Almacenamiento, transporte y proceso, principalmente para instalaciones químicas y petroquímicas. No contempla accidentes en plataformas petrolíferas, minas o con productos nucleares.	Fuentes públicas generales	País: Reino Unido Obtención de los datos: 1. Por contacto directo. 2. Por consulta on-line 3. CD-rom Idioma: ingles
FACTS	15000 (creado en 1980 contiene datos desde 1930, aunque la mayoría corresponde al período 1960 – 1993)	Con sustancias peligrosas; incluye: Almacenamiento, transporte, carga / descarga, proceso y uso.	Fuentes públicas generales, investigaciones propias, informes técnicos procedentes de compañías privadas u organismos estatales-	País: Holanda Consulta off-line disponible en disquete de PC. Anualmente actualizado Idioma: inglés
SONATA	2500 (un 94% corresponde al período de 1960 – 1980; un 5% al período 1930 – 1960 y el resto 1% a accidente anteriores a 1930)	Con sustancias peligrosas; incluye: Almacenamiento, transporte, carga / descarga, proceso y uso.	Fuentes públicas	País: Italia Ha dejado de actualizarse Idioma: inglés
MARS	167 (1984 a la actualidad)	Con sustancias peligrosas; incluye: Almacenamiento, transporte, carga / descarga, proceso y uso.	Información pública sobre los accidentes en instalaciones de los países de la Comunidad afectados por la Directiva Seveso	Banco de datos de los accidentes notificados a la Comisión de la CEE para la aplicación de la Directiva Seveso. En 1991 se publica un informe sobre las enseñanzas adquiridas en estos accidentes. Actualmente en proceso de actualización y cubriendo 121 casos Idioma: ingles

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Ventajas:

- El establecimiento de hipótesis de accidentes se basa en casos reales.

Inconvenientes:

- Los accidentes sobre los que se puede encontrar 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 microfilmada.
- Los datos a menudo no son extrapolables a instalaciones de diseños diferentes. Los accidentes producidos en el pasado han tenido en general respuestas en modificaciones o prácticas operativas más seguras que hacen que sea más difícil que se reproduzcan en condiciones similares.

1.1.2 CHECK LISTS

"Check Lists" o listas de comprobación, son utilizadas usualmente para determinar la adecuación a un determinado procedimiento o reglamento. La primera referencia bibliográfica al método es de 1971, artículo publicado por Millar and Howard en la revista inglesa *Major Loss Prevention in Process Industries (Londos Institution of Chemical Engineers)*

DESCRIPCIÓN

Son listas de fácil aplicación y pueden ser utilizadas en cualquier fase de un proyecto o modificación de una planta. 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.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Ya se ha mencionado que son aplicables a todas las fases de un proyecto, y poseen, además, la doble vertiente de comunicación entre miembros del proyecto y control del mismo.

A título recordatorio, podemos indicar su empleo en:

- Diseño
- Construcción.
- Puesta en marcha.
- Operación.
- Paradas.

El resultado de la aplicación de esta lista es la identificación de riesgos comunes y la adecuación a los procedimientos de referencia.

Los resultados son siempre cualitativos pero suelen limitarse al cumplimiento o no de las normas de referencia.

RECURSOS NECESARIOS

Las listas de inspección deben ser preparadas por personas de gran experiencia.

Es necesario disponer de las normas o estándares de referencia, así como de un conocimiento del sistema o planta a analizar.

Pueden ser puestas en práctica por un titulado sin gran experiencia, aunque los resultados deben ser supervisados por alguien con experiencia.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Cuando se debe aplicar esta técnica de forma reiterada, es usual que las empresas consultoras de seguridad tengan desarrollados formatos informatizados que cubran determinados procedimientos o reglamentos.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Es un método que permite comprobar con detalle la adecuación de las instalaciones.

Constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instrucciones técnicas.

Es un método que examina la instalación solamente desde el punto de vista de cumplimiento de un reglamento o procedimiento determinado.

1.1.3 ANÁLISIS PRELIMINAR DE RIESGOS

Bajo el nombre inglés de Preliminary Hazard Análisis (PHA) este método fue desarrollado inicialmente por las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos e incorporado posteriormente bajo diferentes nombres por algunas compañías químicas.

DESCRIPCIÓN

El Análisis Preliminar de Riesgos (APR en adelante) fue el precursor de otros métodos de análisis más complejos y es utilizado únicamente en la fase de desarrollo de las instalaciones y para casos en los que no existen experiencias anteriores, sea del proceso, sea del tipo de implantación.

El APR selecciona los productos peligrosos y los equipos principales de la planta.

El APR se puede considerar como una revisión de los puntos en los que pueda ser liberada energía de una forma incontrolada.

Fundamentalmente, consiste en formular una lista de estos puntos con los peligros ligados a:

- Materias primas, productos intermedios o finales y su reactividad. Equipos de planta.
- Límites entre componentes de los sistemas.
- Entorno de los procesos.
- Operaciones (pruebas, mantenimiento, puesta en marcha, paradas, etc.)
- Instalaciones.
- Equipos de seguridad.

Los resultados de este análisis incluye recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros. Estos resultados son siempre cualitativos, sin ningún tipo de priorizados.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Se utiliza preferentemente para la identificación de riesgos en la fase de diseño previo de nuevas instalaciones para prever los principales y profundizar en el resto de riesgos en el diseño final.

RECURSOS NECESARIOS

Debe disponer los criterios básicos de diseño de la planta, especificaciones básicas de equipos principales y especificaciones de materiales.

Este método puede ser desarrollado por uno o dos técnicos con conocimientos y experiencia en seguridad. En algunos casos, puede ser aplicado por personal con relativamente poca experiencia.

Con todo lo comentado hasta aquí, está claro que el esfuerzo necesario para el desarrollo de un APR es mucho menor que otros métodos de mayor complejidad que se comentarán más adelante.

SOPORTES INFORMATICOS

Normalmente no se utiliza un soporte informático en la realización de esta técnica

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Es un método que requiere relativamente poca inversión en su realización, por lo que es adecuado para examinar los proyectos de modificaciones o plantas nuevas en una etapa inicial.

En instalaciones existentes no es un método adecuado para entrar en el detalle de los riesgos asociados a las mismas.

COMO SE REALIZA UN APR

Para realizar un APR deben cubrirse las siguientes etapas:

- Recogida de la información.
- Realización del APR propiamente dicho.
- Informe de resultados.

Estas etapas consisten en:

a) Información necesaria:

Debe recogerse la información existente en relación con la nueva planta, incluyendo aquella referente instalaciones semejantes o en plantas con otros procesos pero con equipo o materiales semejantes.

Son informaciones básicas las del propio proceso, así como las referentes a los equipos principales, y las del entorno en el que la planta será operada.

Son fundamentales las informaciones en relación con anteriores procesos, y otras plantas semejantes.

b) Realización del APR:

El objetivo del APR es identificar los riesgos, los sucesos iniciadores y otros sucesos que provoquen consecuencias indeseables. Pueden identificarse, asimismo, criterios de diseño o alternativas que contribuyan a eliminar o reducir estos peligros o riesgos.

Deben considerarse los siguientes puntos:

- Equipos y materiales peligrosos (combustibles, sustancias altamente reactivas, tóxicas, sistemas de alta presión, etc.)
- Interrelaciones peligrosas entre equipos y sustancias (iniciación y propagación de fuegos y explosiones, sistemas de control y paro).
- Factores ambientales (vibraciones, humedad, temperaturas externas, descargas eléctricas).
- Procedimientos de operación, pruebas, mantenimiento y emergencias (errores humanos, distribución de equipos, accesibilidad, protección personal).
- Instalaciones (almacenamientos, equipos de prueba, formación).
- Equipos de seguridad (sistemas de protección, redundancias, sistemas contraincendios, equipos de protección personal).

c) Informe de los resultados:

Los resultados del APR deben ser registrados adecuadamente de forma que se vea claramente los peligros identificados, la causa, la consecuencia potencial, y las diferentes medidas preventivas o correctivas.

A título de ejemplo se incluye una parte de un APR de un posible almacenamiento de sulfuro de hidrógeno (H₂S) para utilización en proceso

Riesgo	Causa	Consecuencias	Medidas preventivas o correctivas
Fuga tóxica	1) Pérdida en cilindro de almacenamiento.	Peligro de muerte si la fuga es importante	a) Colocar sistemas de detección y alarma. b) Minimizar la cantidad almacenada. c) Desarrollar un procedimiento de inspección de los cilindros.

1.1.4 ANÁLISIS “WHAT IF?” (QUÉ PASA SI...?)

La traducción literal de este nombre podría ser “¿Qué pasa si...?”; es un método de análisis que no es tan estructurado como otros (HAZOP –*Hazard Operability Study*, FMEA –*Failure Mode Effects Analysis*) y necesita la adaptación por parte del usuario al caso particular que se pretende analizar.

Como su nombre sugiere, consiste en cuestionarse el resultado de la presencia de sucesos indeseados que pueden provocar consecuencias adversas.

DESCRIPCIÓN

El método exige el planteamiento de las posibles desviaciones desde el diseño, construcción, modificaciones de operación de una determinada instalación.

Evidentemente, requiere un conocimiento básico del sistema y la disposición mental para combinar o sintetizar las desviaciones posibles ya comentadas, por lo que normalmente es necesaria la presencia de personal con amplia experiencia para poder llevarlo a cabo.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

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

Las preguntas se formulan en función de la experiencia previa y se aplican, tanto a proyectos de instalación, como a plantas en operación, siendo muy común su aplicación ante cambios propuestos en instalaciones existentes.

RECURSOS NECESARIOS

Normalmente las cuestiones se formulan por un equipo de dos o tres personas especialistas en las áreas apuntadas en el apartado anterior, los cuales necesitan documentación detallada del proceso, de los procedimientos y posibles entrevistas con personal de operación.

El resultado del trabajo será un listado de posibles escenarios incidentales, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción de riesgo.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Normalmente no se utiliza un soporte informático en la aplicación de esta técnica.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Es un método menos estructurado que el HAZOP y FMEA, por lo que su aplicación es más sencilla, sin embargo su exhaustividad depende más del conocimiento y experiencia del personal que lo aplica.

Como se realiza un análisis What If?

Normalmente el equipo de trabajo empieza sus preguntas en el comienzo del proceso y las prosigue a lo largo del mismo. En ocasiones el método puede centrarse en determinadas consecuencias específicas (seguridad personal, por ejemplo).

Se van anotando sucesivamente todas las preguntas, y respuestas, incluyendo peligros, consecuencias y soluciones. El estudio se completa recopilando los comentarios de todos los equipos y revisando las recomendaciones por parte del nivel adecuado de gerencia.

Las etapas fundamentales de un análisis What If? son:

- Definición del alcance del estudio.
- Recogida de la información necesaria.
- Definición de los equipos.
- Desarrollo de las cuestiones.
- Informe de resultados.

Las características básicas de cada etapa son las siguientes:

a) Definición del alcance del estudio

Existen dos alcances básicos en un análisis What If: las condiciones físicas del sistema investigado y la categoría de las consecuencias del mismo.

Debe definirse en primer lugar la categoría de las consecuencias (para el público, para los trabajadores de la planta o económicas), siendo que, a su vez estas categorías pueden subdividirse en otras menores. Una vez definidas estas categorías, puede definirse el alcance físico del estudio, incluyendo posibles interacciones entre diferentes partes de la planta.

b) Recogida de la información necesaria

Es necesaria que toda la información requerida se encuentre disponible al inicio del trabajo para poder desarrollarlo sin interrupciones. Un resumen típico de la información requerida se muestra a continuación:

I Diagrama de Flujo:

1. Condiciones de operación:

- Sustancias utilizadas, con características físicas.
- Química y termodinámicas del proceso.

2. Descripción de los equipos.

II. Distribución de los equipos (Plot Plan)

III. Diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID)

1. Controles

- Sistemas de control en continuo.
- Alarmas y sus funciones.

2. Instrumentación:

- Cuadros
- Indicadores.
- Monitores.

IV. Operaciones:

1. Responsabilidades y obligaciones del personal.

2. Sistemas de comunicación

3. Procedimientos:

- Mantenimiento preventivo.
- Permisos de trabajo en caliente.
- Entradas en recipientes.
- Emergencia.

La última parte de la recogida de la información es la preparación de las preguntas. En este aspecto, otros métodos como las Listas de Inspección o Check Lists o el HAZOP pueden sugerir ideas para el desarrollo de las preguntas.

c) Definición del equipo de trabajo.

Para cada área específicas deben definirse equipos de dos o tres personas. Cada equipo debe poseer:

- Experiencia en las consecuencias a analizar.
- Conocimientos de la planta o el proceso.
- Experiencias en técnicas de evaluación de riesgos.

El equipo debe ser multidisciplinario e incluir puntos de vista de producción, fabricación, mantenimiento, ingeniería y seguridad.

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.

Los equipos no es necesario que trabajen aislados, sino que es conveniente que intercambien cuestiones para asegurar el buen camino del proceso. Es conveniente que trabajen en días alternados y con una dedicación diaria de cuatro a seis horas como máximo.

El equipo va formulando las preguntas desde el inicio del proceso y va respondiendo las mismas y, eventualmente, añadiendo nuevas preguntas; ya identificando los peligros, las posibles consecuencias y las soluciones.

Se considera, como ejemplo simplificado, un proceso de fabricación en continuo de fosfato diamónico (PAD) por reacción de ácido fosfórico con amoníaco. El PAD es inocuo. Si se reduce la proporción de fosfórico, la reacción no se completa y se desprende amoníaco. Si se reduce el amoníaco, se obtiene un producto seguro pero indeseable.

Se destina un equipo a investigar los peligros de la reacción para las personas.

Las cuestiones planteadas por What If...? son las siguientes:

¿Qué ocurre si...?

- ¿Se suministra un producto de mala calidad en vez de ácido fosfórico?
- ¿La concentración de fosfórico no es correcta?
- ¿El fosfórico está contaminado?
- ¿No llega fosfórico al reactor?
- ¿Se suministra al reactor una proporción de amoníaco demasiado elevada?
- ¿Se detiene la agitación del reactor?
- ¿Se cierra la descarga del reactor?

Para la primera pregunta se analizarían las sustancias presentes en la planta o disponibles por el suministrador de ácido fosfórico que pudieran ser incompatibles con el amoníaco, provocando daños en las personas. Deberá asegurarse un sistema de preidentificación de estos posibles productos para evitar su introducción en el tanque de ácido fosfórico. Así continúan las respuestas en todo el proceso.

e) Resultados.

Como en otros estudios, la presentación de los resultados es básica para garantizar una aplicación correcta de las conclusiones.

Estas deberán ser revisadas por el director de la planta para garantizar que las conclusiones son transmitidas a cada uno de los responsables por las diferentes actuaciones.

A continuación se adjunta un ejemplo de presentación de resultados, para el ejemplo anterior.

¿Qué ocurre si...?	Consecuencias	Recomendaciones
...¿se suministra producto de mala calidad?	No identificada	
...¿la concentración de fosfórico es incorrecta?	No se consume todo el amoníaco y hay una fuga en la zona de reacción.	Verificar concentración de fosfórico antes de la operación.
...¿el fosfórico está contaminado?	No identificada	
...¿no llega fosfórico al reactor?	El amoníaco no reacciona. Fuga en la zona de reacción.	Alarma / corte del amoníaco por señal de falta en la línea de fosfórico al reactor
...¿demasiado amoníaco en el reactor?	Exceso de amoníaco. Fuga en la zona de reacción	Alarma / corte del amoníaco por señal de falta de flujo en la líneas de fosfórico al reactor.

1.1.5 ANÁLISIS FUNCIONAL DE OPERABILIDAD (HAZOP)

DESCRIPCIÓN

Este método nació en 1963 en la compañía ICI (Imperial Chemical Industries), en una época en que se aplicaba en otras áreas las técnicas de análisis crítico. Estas técnicas consistían en un análisis sistematizado de un problema a través del planteamiento y respuestas a una serie de preguntas (¿cómo?, ¿cuándo?, ¿por qué?, etc). La aplicación de estas técnicas al diseño de una planta química nueva puso de manifiesto una serie de puntos débiles del diseño.

El método se formalizó posteriormente y ha sido hasta ahora ampliamente utilizado en el campo químico como una técnica particularmente apropiada a la identificación de riesgos en una instalación industrial.

El HAZOP o AFO (Análisis Funcional de Operabilidad) es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación. La característica principal del método es que es realizado por un equipo multidisciplinario de trabajo.

La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas "palabras guía".

3. Definición del área de estudio

La primera fase de estudio HAZOP consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una instalación de proceso, considerada como el sistema 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 disolventes...

4. Definición de nodos

En cada subsistema se identifican una serie de nodos o puntos claramente localizados en el proceso. Unos ejemplos de nodos pueden ser: tuberías de alimentación de una materia prima, un reactor aguas arriba de una válvula reductora, impulsión de una bomba, superficie de un depósito,... Cada nodo será numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido del proceso para mayor comodidad. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nodo vendrá caracterizado por unos valores determinados de las variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, estado, etc.

Es conveniente, a efectos de la reproducibilidad de los estudios reflejar en unos esquemas simplificados (o en los propios diagramas de tuberías e instrumentación), los subsistemas considerados y la posición exacta de cada nodo y su numeración en cada subsistema.

Es de notar que por su amplio uso la técnica tiene variantes en cuanto a su utilización que se consideran igualmente válidas. Entre estas destacan, por ejemplo, la sustitución del concepto de nodo por el de tramo de tubería o la identificación nodo-equipo.

5. Definición de las desviaciones a estudiar.

Para cada nodo se planteará de forma sistemática las desviaciones de las variables de proceso aplicando a cada variable una palabra guía. En la tabla 1.2 se indican las principales palabras guía y su significado.

El HAZOP puede consistir en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabras guías y variables de proceso, descartándose durante la sesión las desviaciones que no tengan sentido para un nodo determinado. Alternativamente, se puede fijar a priori en una fase previa la preparación del HAZOP la lista de las desviaciones esenciales a estudiar en cada nodo. En el primer caso se garantiza la exhaustividad del método, mientras que en el segundo el estudio "más dirigido " puede resultar menos laborioso.

6. Sesiones HAZOP

Las sesiones HAZOP tienen como objetivo inmediato analizar las desviaciones planteadas de forma ordenada y siguiendo un formato de recogida similar al propuesto en la figura 1.1. En la tabla 1.3 se describe el contenido de cada una de las columnas.

El documento de trabajo principal utilizado en las sesiones son los diagramas de tuberías e instrumentación aunque puede ser necesarias consultas a otro documentos: diagramas de flujo o flow sheet, manuales de operación, especificaciones técnicas, etc.

Para plantas de proceso discontinuo, al ser secuencial el proceso, el planteamiento difiere la reflexión tiene que llevarse a cabo para cada paso del proceso. El formato de recogida es señalado en la figura 1.2.

TABLA 1.2 PALABRAS GUIAS DEL HAZOP

Palabra guía	Significado	Aplicación	Observaciones
No	Se plantea para estudiar la ausencia de la variable a la cual se aplica	Caudal, Nivel (vaciado de un equipo)	
Inverso	Analiza la inversión en el sentido de la variable.	Caudal	Esta variable en algunos casos se omite y su efecto se contempla en la anterior.
Más	Se plantea para estudiar un aumento cuantitativo de la variable.	Temperatura, Presión, Caudal (composición constante. Nivel.	
Menos	Se plantea para estudiar una disminución cuantitativa de la variable	Idem	
Más cualitativo	Estudia la reducción de un componente en una mezcla.	Caudal (menor cantidad de un producto en una mezcla, alta de un componente)	Ambos términos corresponden a los originales Part of: Cambio de composición. More than: Más componentes presentes en el sistema (vapor, sólidos, impurezas).
Otro	Estudia el cambio completo en la variable	Caudal (cambio completo de productor) Estado	El término original (other than) se aplica a cambios respecto de la operación normal (mantenimiento, cambio, catalizador...).

Es de notar en este último caso que el método no es tan apropiado.

7. 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 recogida 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. Constituyen una lista preliminar que debería ser debidamente estudiada en función de otros criterios (impacto sobre el resto de la instalación, mejor solución técnica, costo, etc.) y cuando se disponga de más elementos de decisión (frecuencia del suceso y sus consecuencias).
- Lista de los sucesos iniciadores identificados.

TABLA 1.3 CONTENIDO DE LAS COLUMNAS DEL FORMATO HAZOP

Columna	Contenido
Causas	Describe numerándolas las distintas causas que pueden conducir a la desviación.
Consecuencias	Para cada una de las causas planteadas, se indican con la consiguiente correspondencia en la numeración las consecuencias asociadas.
Respuesta del sistema	Se indicará en este caso: 1. Los mecanismos de detección de la desviación planteada según causas (p.ej. alarmas) 2. Los automatismos capaces de responder a la desviación planteada según causas (p. ej: lazo de control).
Acciones a tomar	Propuesta preliminares de modificaciones a la instalación en vista a la gravedad de la consecuencia identificada o una desprotección flagrante de la instalación.
Comentarios	Observaciones que complementan o apoyan algunos de los elementos reflejados en las anteriores columnas.

FIGURA 1.1 FORMATO DE RECOGIDA DEL HAZOP (PROCESO CONTINUO)

Planta:
 Sistema

Nodo	Palabra guía	Desviación de la variable	Posibles causas	Consecuencias	Respuesta control	Señalización	Acciones a tomar	Comentarios

**FIGURA 1.2 FORMATO DE RECOGIDA DEL HAZOP
(PROCESO DISCONTINUO)**

Planta:
Unidad:
Subsistema:

Nodo	Operación	Palabra guía	Desviación de la variable	Posibles causas	Consecuencias	Señalización	Actuación	Acciones requerida	Observaciones

ÁMBITO DE APLICACIÓN

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

Es particularmente provechosa su aplicación en plantas nuevas porque puede poner de manifiesto fallos de diseño, construcción, etc. Que han podido pasar desapercibidos en la fase de concepción. Por otra parte, las modificaciones que puedan surgir del estudio pueden ser más fácilmente incorporadas al diseño.

Aunque el método esté enfocado básicamente a identificar sucesos iniciadores relativos a la operación de la instalación, por su propia esencia, también puede ser utilizado para sucesos iniciadores externos a la misma.

RECURSOS NECESARIOS

La característica principal de la técnica es que se realiza en equipo en sesiones de trabajo dirigidas por un coordinador. El equipo de trabajo debería de estar compuesto, como mínimo, por:

- Responsable de proceso
- Responsable de la operación.
- Responsable de seguridad.
- Responsable del mantenimiento.
- Coordinador.

Adicionalmente se puede recurrir a consultas puntuales a técnicos de otras áreas como instrumentación, laboratorio, etc. En una planta en fase de diseño se completará el equipo con un responsable del diseño, uno de proyecto y el futuro responsable de la puesta en marcha.

Las personas que toman parte en las sesiones deberán de ser personas

- Muy conocedoras de la planta y expertas en su campo.
- Dispuestas a participar activamente.

No es necesario que tengan un conocimiento previo del método en sí.

Una de las personas que formen parte del equipo de trabajo tendrá encomendada la labor de transcripción de las sesiones de forma precisa y lo más completa posible. Deberá tener capacidad de síntesis y un buen conocimiento tanto de la instalación como del método.

Destaca en el método el papel del coordinador quien conduce las sesiones. Deberá de ser una persona:

- Relativamente “objetiva”
- Con un buen conocimiento del método.
- Con amplia experiencia industrial.
- Con capacidad de organización (debe potenciar la participación de todos los presentes, cortar disquisiciones improductivas, estimular la imaginación, favorecer un ambiente de colaboración y competencia «sanos», etc.).

En promedio se podría evaluar en tres horas el tiempo de dedicación necesario para cada nodo a estudiar repartidas en partes iguales en:

- Preparación.
- Sesión.
- Revisión y análisis de resultados.

Siendo las actividades primera y última las realizadas por el coordinador.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Existen algunos programas informáticos que permiten registrar las sesiones de HAZOP de forma directa. Entre ellos se puede citar: el programa desarrollado por la compañía Dupont de Nemours, HAZSEC (compañía técnica), HAZTRAC (Technica), HAZOP (compañía ITSEMAP), etc. Guían al técnico durante las sesiones y permiten en general una posterior agrupación y clasificación de las recomendaciones surgidas en el estudio.

Ventajas / Inconvenientes.

Además de cubrir los objetivos para los cuales se utiliza el método, se pueden destacar, entre otras, las siguientes ventajas adicionales al método:

3. Ocasión perfecta y quizás “única” para contrastar distintos puntos de vista de una planta.
4. s una técnica sistemática que puede crear desde el punto de vista de seguridad hábitos metodológicos útiles.
5. El coordinador mejora su conocimiento del proceso.
6. No requiere prácticamente recursos a exclusión del tiempo de dedicación, etc.

Como inconvenientes se podrían citar también:

1. Es una técnica cualitativa. No hay una valoración real de la frecuencia de las causas que producen una consecuencia grave ni tampoco de alcance de la misma.

2. Las modificaciones a la planta surgida del HAZOP deben analizarse con mayor detalle y otros criterios (económicos, etc)
3. Los resultados obtenidos son muy dependientes de la calidad del equipo.
4. Es muy dependiente de la información. Puede omitirse un riesgo si los datos de partida son erróneos o incompletos.

1.1.6 ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE LOS FALLOS (FMEA)

Corresponde al acrónimo anglosajón del *Failure Mode and Effects* Análisis. Una descripción de una aplicación de una aplicación completa del método se incluye en el artículo de King y Rudd publicado en el AIChE J en 1971.

DESCRIPCIÓN

Este método consiste en la tabulación de los equipos y sistemas de una planta química, estableciendo las diferentes posibilidades de fallo y las diversas influencias (efectos) de cada uno de ellos en el conjunto del sistema o de la planta.

Los fallos que se consideran son típicamente, las situaciones de anomalía tales como:

- Abierto cuando normalmente debe estar cerrado.
- Cerrado cuando normalmente debe estar abierto.
- Marcha cuando normalmente deba estar parado.
- Paro cuando normalmente deba estar en marcha.
- Fugas cuando normalmente deba ser estanco.
- Otros

Los efectos son el resultado de la consideración de cada uno de los fallos identificados individualmente sobre el conjunto de los sistemas o de la planta.

El método FMEA establece finalmente, que fallos individuales pueden afectar directamente o contribuir de una forma destacada al desarrollo de los accidentes de una cierta importancia en la planta.

Este método no considera los errores humanos directamente, sino su consecuencia inmediata de mala operación o situaciones de un componente o sistema.

Tampoco establece las diferentes combinaciones de fallos de equipos o secuencias de los mismos que pueden llegar a provocar un accidente final de mayores consecuencias.

El FMEA es un método cualitativo que establece una lista de fallos, sistemáticamente, con sus consiguientes efectos y puede ser fácil aplicación para cambios en el diseño o modificaciones de la planta.

Ámbito de aplicación

El método FMEA puede ser utilizado en las etapas de diseño, construcción y operación. En la etapa de diseño es útil la identificación de protección adicionales que puedan ser fácilmente incorporados para la mejora de equipos y sistemas.

En la etapa de construcción puede ser utilizado para una evaluación de modificaciones que pueden surgir por cambios inducidos en campo.

En periodo de operación el FMEA es útil para la evaluación de modificaciones que puedan surgir por cambios inducidos en campo.

Su uso puede ser, con limitaciones, alternativo a un HAZOP, aunque encuentre su mayor aplicación como fase previa a la elaboración de árboles de fallos, ya que permiten un buen conocimiento de los sistemas.

RECURSOS NECESARIOS

Normalmente, el método FMEA puede llevarse a cabo por un equipo de dos analistas que conozcan perfectamente las funciones de cada equipo o sistema, así como la influencia de estas funciones en el resto de la línea o proceso. Para sistemas complejos, el número de analistas deberán ser incrementado en función de la complejidad y especialidades a ser cubiertas.

Para garantizar la efectividad del método, debe disponerse de:

- Lista de equipos y sistemas.
- Conocimiento de las funciones de los equipos.
- Conocimientos de las funciones de los sistemas y la planta.

La dedicación ya se ha comentado que es proporcional a la complejidad, y es muy poco significativo intentar establecer un índice promedio de dedicación.

SOPORTES INFORMÁTICOS.

Normalmente no es necesario un sistema informático de apoyo, aunque en sistemas más complejos puede ser útil un sistema corriente de base de datos en el caso de establecer comentarios simples y objetivos para cada caso.

Ventajas / Inconvenientes

Se ha citado anteriormente la rapidez del método frente a otros más complejos como puede ser el HAZOP

Los resultados que proporciona el método son funciones de esta misma simplicidad siendo en todo caso meramente cualitativos.

En todo caso, supone un análisis metódico y ordenado de todo los fallos que pueden presentarse en un equipo, sistema, proceso o planta y que puede suponer una aproximación relativamente poco costosa a las situaciones accidentales que estos fallos pueden provocar.

COMO SE REALIZA UN ANÁLISIS DE MODO DE EFECTO Y FALLO FMEA

Para desarrollar un FMEA, deben contemplarse las siguientes etapas:

- Determinar el nivel de detalle.
- Desarrollar un formato de trabajo.
- Definir el problema y las condiciones del entorno.
- Llenar la tabla FMEA.
- Informar los resultados.

Se comenta brevemente a continuación cada uno de estos conceptos:

a) Nivel de detalle.

El análisis puede desarrollarse a nivel de sistemas o de componentes, y ello debe definirse claramente al inicio de la labor.

Un ejemplo puede aclararlo mejor: si se estudia una planta, se puede definir como sistema en fallo el sistema de alimentación, el sistema de mezcla, el de oxidación, el de separación de producto y los sistemas auxiliares. Para cada uno de estos grandes conjuntos, por ejemplo el de oxidación, se podría estudiar los fallos en las bombas de alimentación, la bomba de refrigeración, la válvula de control del circuito de agua de refrigeración, el sensor de temperatura del reactor, el controlador de temperatura, la alarma de temperatura máxima, el transmisor, etc.

b) Formato de trabajo.

El tipo de tabla que debe ser desarrollado para soporte de la labor, debe tener en cuenta, inicialmente, el nivel de detalle definido en el apartado anterior.

Un ejemplo podría ser:

Fecha.....		Página..... de.....		
Planta.....		Analista.....		
Sistema.....		Referencia		
Item	Identificación	Designación	Modo de fallo	Efectos

Pueden introducirse otras columnas (criticidad, por ejemplo, en el caso del FMEA), (probabilidades de fallo cuando se conozcan), en preparación de otros tipos de análisis (cuantitativos, por ejemplo).

c) Definición del problema y condiciones del entorno.

Se trata de determinar previamente que partes deberá tener en cuenta el FMEA. Los elementos mínimos para la definición del problema son:

- Identificación de la planta y/o sistemas analizar.
- Establecer los límites físicos del sistema de análisis. Ello implica definir los límites con otros sistemas. Un buen método es dibujar estos límites en un diagrama de flujo.
- Recoger la información necesaria para identificar tanto los equipos como su relación con el sistema o planta.

d) Llenar la tabla FMEA

La tabla desarrollada en el inciso (b) debe ser completada de forma sistemática, reduciendo la posibilidad de omisiones.

Un diagrama de flujo puede ser un buen auxiliar para este fin. A medida que se colocan los equipos en la lista se van tachando en el diagrama original de forma bien visible.

En el desarrollo de la labor no debe dejarse ningún ítem por completar antes de pasar al siguiente.

Deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

Identificación de equipos de forma biunívocas, utilizando, si es necesario, códigos o denominaciones particulares.

- Descripción de los equipos de forma que se incluya en la misma la función y posibles características básicas, como por ejemplo: "válvula motorizada, normalmente cerrada, en la línea de DN50 de sosa cáustica".
- Deben establecerse todos los modos de fallos para cada equipo en relación a sus condiciones normales de operación. Así, por ejemplo, los fallos de una válvula de control normalmente abierta pueden ser:
 - Fallo abre
 - Cambio a posición cerrada
 - Pérdida al exterior
 - Ruptura del cuerpo

En cualquier caso, deben limitarse las consideraciones a aquellas situaciones que pueden provocar consecuencias importantes.

Para cada fallo identificado, deben determinarse los efectos en otros equipos o en el sistema.

Por ejemplo, una pérdida de líquido por el sello de una bomba tiene como efecto inmediato un derrame en la zona de la bomba. Si el fluido es inflamable, puede preverse un incendio que pueda afectar los equipos vecinos.

El analista puede introducir comentarios adicionales sobre los equipos afectados.

e) Resultados

El resultado de un FMEA será una tabla de los efectos de los fallos de cada componente sobre el proceso o sistema.

Los fallos identificados que provoquen consecuencias inaceptables deberán ser corregidos hasta niveles de aceptabilidad.

Los resultados de un FMEA pueden ser utilizados como primer paso de análisis más detallados de partes especialmente críticas (HAZOP o Árboles de fallos)

1.1.7 ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LOS FALLOS (FMEAC)

Para no caer en reiteraciones, se referirá este método en relación con el FMEA comentado en el apartado 1.1.6

La diferencia fundamental en relación con el FMEA es que el FMEAC, además de establecer una relación entre los diferentes modos de fallo de un equipo o sistema y las consecuencias de cada uno de ellos añade a esta consideración el establecimiento de la criticidad de cada uno de estos fallos. Es decir, establecer un orden relativo de importancia de los fallos en función de las consecuencias de cada uno de ellos.

Como consideraciones generales de la metodología se relacionarán todas las características indicadas en el apartado 1.1.6 con los siguientes aspectos adicionales.

- a. En la Tabla Formato de Trabajo se añadirá una columna con el concepto de criticidad.
- b. En cuanto a la definición del problema y las condiciones del entorno, se añadirá la necesaria definición de unas condiciones o conceptos básicos de criticidad que permitan apreciar las diferencias de importancia entre las posibles consecuencias derivadas de los fallos analizados.

Como ejemplo se puede citar, para un caso hipotético:

Efecto	Criticidad
Ninguno	1
Peligro menor para las personas y las instalaciones. No se requiere parada de proceso	2
Peligros para las personas y las instalaciones. Se requiere parada programada del proceso	3
Peligro inmediato para las personas y las instalaciones. Se requiere parada de emergencia	4

- c. Cada uno de los fallos y sus efectos son comparados bajo los conceptos básicos definidos en el apartado criticidad, y se ordenan en función de esta criticidad.
- d. En el informe final, se destacan los fallos que pueden provocar efectos de criticidad absolutamente inaceptables. Las actuaciones prioritarias irán dirigidas a aportar soluciones frente a estos fallos.

Con estas consideraciones adicionales, el resto del método FMEAC es absolutamente igual al FMEA.

1.2 METODOS SEMICUANTITATIVOS

Se entiende por métodos de evaluación de riesgo semicuantitativos, aquellos que no llegando al detalle y rigor de una evaluación cuantitativa del riesgo, suponen un avance hacia ello desde los métodos cualitativos, en el sentido que son métodos que dan como resultado una clasificación relativa del riesgo asociado a una planta química o a partes de la misma.

Los métodos desarrollados en este sentido y que son de mayor difusión y conocimiento general son los denominados "Índice de DOW de fuego y explosión" y el "Índice de MOD"

El primero de ellos fue desarrollado por la compañía Dow Chemical y el segundo por el grupo ICI – *Imperial Chemical Industries PLC*.

Ambos métodos se basan en la asignación de penalización y/o bonificaciones a las instalaciones de una planta química.

Las penalizaciones son asignadas en función de las sustancias presentes y las condiciones de proceso.

Las bonificaciones tienen en cuenta las instalaciones de seguridad que pueden mitigar o prevenir los efectos accidentales.

La combinación de ambas lleva a la determinación del índice con el que se afecta una determinada parte de la instalación, pudiendo examinar, a la vista de estos índices, la importancia relativa de las partes estudiadas en función del riesgo asociado.

1.2.1 ÍNDICE DE DOW DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN

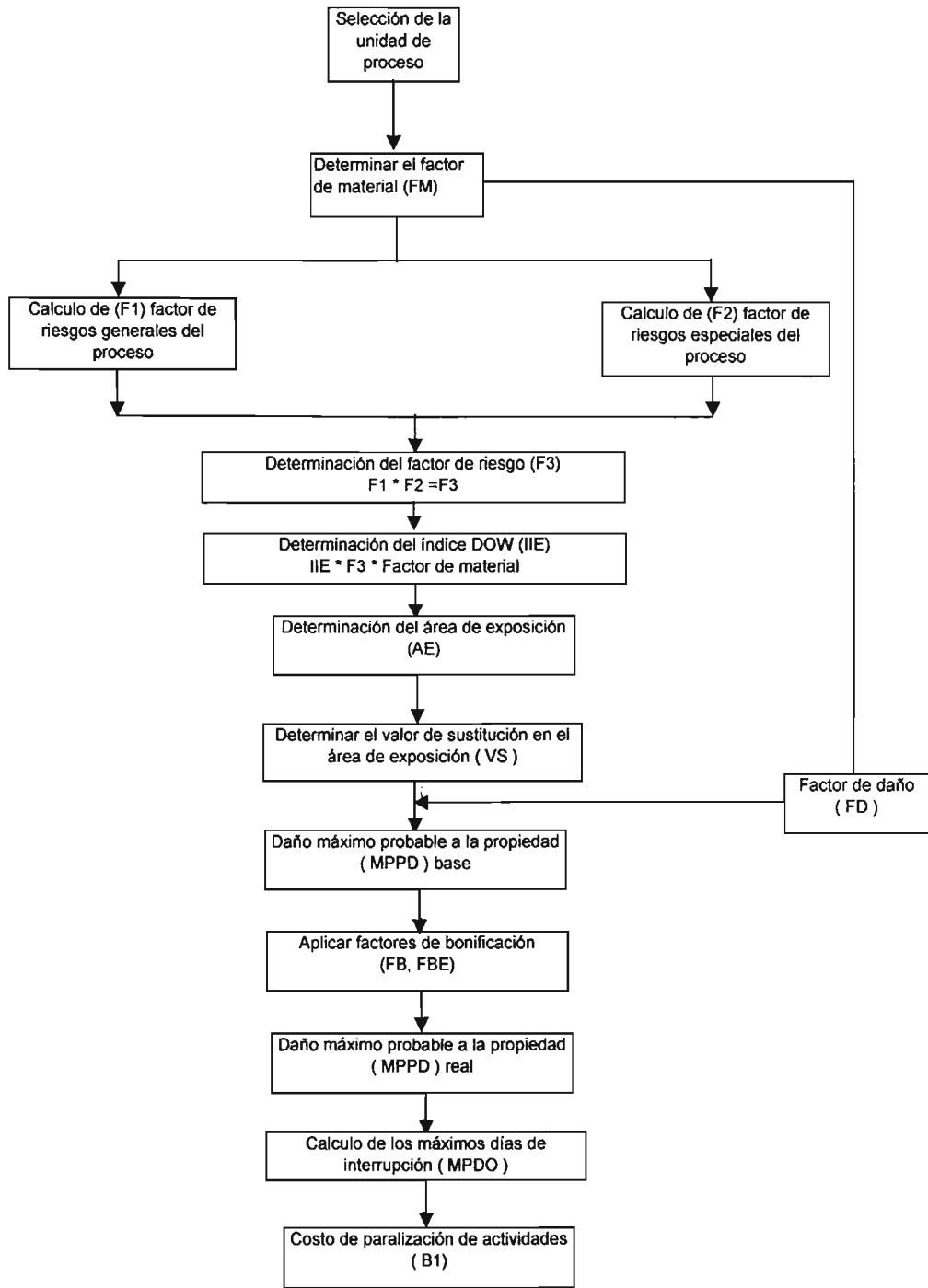
Con el título original de DOW's FIRE & Explosion Index, publicado por primera vez en 1966, llegó a su sexta edición en el año 1987, en el que se incorpora por primera vez una penalización específica a los productos tóxicos.

Con los principios básicos que se comentarán a continuación, y ya apuntados en el preámbulo de este capítulo, las ediciones sucesivas han ido acumulado las experiencias adquiridas en las aplicaciones del método. Por ejemplo, la quinta edición incluía métodos de estimación de los tiempos de interrupción del servicio y de los costos derivados de estas interrupciones, en función de los riesgos evaluados; la sexta edición incluye, entre otra, la novedad de considerar la toxicidad de los productos como una posible complicación en las respuestas frente a emergencias.

DESCRIPCIÓN

El método se desarrolla siguiendo las etapas que a continuación se comentarán brevemente y que se exponen de forma gráfica y resumida en la figura 1.3

FIGURA 1.3 METODO DOW. PROCEDIMIENTO DE CALCULO



FUENTE: DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide. Sexta edición 1987

- a. Dividir la planta química en estudio en “unidades de proceso” para cada una de las cuales se determinará su “Índice de Incendio y Explosión” (IIE).
- b. Determinar el “Factor de Material” (FM) para cada Unidad.
- c. Evaluar los factores de riesgo, considerando las condiciones generales de proceso (reacciones exotérmicas o endotérmicas, transporte de material, accesos, etc.) (F1) y los riesgos específicos del proceso / producto tóxico peligroso, operación en vacío, operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad, y otra (F2).
- d. Calcular el “Factor de Riesgos” (F3) y el “Factor de Daño” (FD) para cada unidad determinada en el inciso a) .
- e. Determinar los Índices de Incendio y Explosión (IIE) y el Área de Exposición para cada Unidad de Proceso seleccionada (AE).
- f. Calcular el valor de sustitución del equipo en el área de exposición (VS).
- g. Calcular el Daño Máximo Probable a la Propiedad (MPPD) ⁽¹⁾, tanto básico como real, por consideración de los factores de bonificación (FB y FBE).
- h. Determinar los Máximos Días de Interrupción (MPDO) ⁽²⁾ y los costos por Paralización de la Actividad (B1) ⁽³⁾ en estos días .

(1) Se mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Maximum Probable Property Damage*.

(2) Se mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Maximum Probable Days Outage*.

(3) Se mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Business Interruption*

Para tener una idea básica de los parámetros que el desarrollo del Índice de DOW obliga a considerar, se estudia con un mínimo de detalle el contenido de cada una de las etapas indicadas anteriormente. Como consideración general, no se pretende en este punto sustituir el contenido de las Guías de Aplicación del Índice DOW, que son claras y precisas para la aplicación del método.

UNIDADES DE PROCESO

Las instalaciones en estudio se dividen en “Unidades de Proceso” que pueden consistir en equipos individuales de proceso (columnas, reactores, tanques, etc.) o líneas de proceso que presenten condiciones operatorias semejantes y con implicaciones de las mismas sustancias.

El criterio básico de adopción para seleccionar estas unidades será, por un lado, el nivel de detalle del estudio pretendido y, por otro, la homogeneidad necesaria que permita la aplicación correcta del método.

FACTOR DE MATERIAL

Es el denominado “Material Factor (FM) en la versión original y da una medida de la intensidad de liberación de energía de una sustancia o mezcla de las mismas.

Este valor es un índice variable de 1 a 40, y el método facilita la forma de determinarlo directamente para una lista de más de 300 sustancias, así como los criterios para determinar el correspondiente a sustancias no incluidas en la lista o las mezclas de multicomponentes, o la corrección necesaria en caso de operación a temperaturas diferentes de la temperatura ambiente.

FACTORES DE RIESGO

Para tener en cuenta las especiales condiciones de proceso que modifique el riesgo de las instalaciones en estudio se consideran dos tipos de "Factores " de riesgo:

- a. Factor de Riesgos Generales del Proceso (*General Process Hazards*) (F1)
- b. Factor de Riesgos Especiales del Proceso (*Special Process Hazards*) (F2)

Ambos suponen unas penalidades a aplicar al FM, que tienen en cuenta los siguientes aspectos:

F1: Reacciones exotérmicas (ligeramente exotérmicas, moderadamente exotérmicas, exotérmicas con control crítico, exotérmicas particularmente sensibles).

- Procesos endotérmicos (calcinación, electrólisis pirólisis).
- Transferencia de producto (carga o descarga de sustancias altamente inflamables, mezcla, introducción de aire, atmósferas no inertes, etc.)
- Condiciones de ventilación (filtros, manipulación en locales cerrados, ventilaciones mecánicas).
- Condiciones de acceso a las áreas de proceso.
- Características de los sistemas de drenaje y de control de derrames (cubetos, distancias de tanques a instalaciones y otros).

F2: Toxicidad de las sustancias, consideradas como complicación adicional en caso de intervención en emergencias, no desde el punto de vista de seguridad e higiene ni medio ambiental.

- Operación en presiones inferiores a la atmosférica (por posible entrada de aire y formación de atmósferas inflamables o explosivas).
- Operación en temperaturas cercanas al punto de inflamabilidad.
- Presencia de polvos explosivos.
- Sistemas de alivio de presión y presiones de operación.
- Bajas de temperaturas
- Cantidades de sustancias inflamables o inestables.
- Corrosión y erosión.
- Condiciones de estanqueidad (juntas, sellos, empaquetaduras).
- Utilización de generadores de calor con combustión (generadores de fluido térmico, y otros).
- Equipos rotativos (compresores, bombas, agitadores).
- Calentadores con llama directa.

Determinados los valores de F1 y F2, se calcula el Factor de Riesgo (*Unit Hazard Factor*) F3, por el producto entre ambos:

$$F1 * F2 = F3$$

Donde:

F1: Factor de riesgos generales del proceso.

F2: Factor de riesgos especiales.

F3: Factor de riesgo.

El valor del Índice DOW de Incendio y Explosión, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IIE = FM * F3$$

Donde,

FM: Factor de material.

F3: Factor de riesgo.

IIE: Índice de Incendio y Explosión.

Según el valor calculado para este índice, y a través del proceso que facilita la propia Guía, se determina el Radio (RE) o Áreas de Exposición (AE) que representaría, o daría una idea de la parte afectada por un incendio o una explosión generada en la Unidad de Proceso estudiada.

Paralelamente, y en función del Factor de Material (FM) y el Factor de Riesgo (F3) se determina, asimismo, el denominado Factor de Daño (FD). El valor de sustitución (VS) se puede calcular de acuerdo con:

$$VS = \text{Valor de la instalación} * 0.82 * FE$$

Donde, FE es de factor de escalado, relación del área afectada o de exposición (AE) con respecto de área total de la instalación.

El Factor de Daño (FD), unido a la consideración del Radio de Exposición (RE), proporciona el Máximo Daño Probable a la Propiedad (MPPD).

Factores de Bonificación

Hasta aquí se han considerado todos los factores (material y riesgos) que en algún aspecto incrementan el riesgo global de la planta y a través de ellos se ha determinado el Máximo Daño Probable a la Propiedad.

Una interpretación de este valor podría ser considerar que será el daño producido cuando fallasen absolutamente todas las medidas de prevención y protección existentes en una instalación industrial.

El hecho es que estas instalaciones existen y, por lo tanto, el estudio de la realidad debe considerarlas.

Por ello, una vez determinados todos los valores de riesgo, se introducen los Factores de Bonificación que tienen tres aspectos principales:

C1: por control de proceso.

C2: por aislamiento material.

C3: por protección contra fuego.

Brevemente, estos factores consideran:

C1: Energía de emergencia, refrigeración, control de explosiones, paro de emergencia, control por ordenador, disponibilidad de gas inerte, procedimientos de operación, programas de revisión de procesos y operaciones.

C2: Válvulas de control remoto, drenajes, enclavamientos, tanques para vertidos de emergencia.

C3: Detectores, protección de estructuras, tanques de doble pared, suministro de agua contra incendios, sistemas especiales (CO₂, detectores de humos y de llamas), rociadores, cortinas de agua, espuma contra incendios, extinguidores manuales, protección de cables eléctricos y de instrumentación.

Los factores C1, C2 y C3 siempre poseen valores menores que la unidad y variables desde 0.74 a 0.99.

El Factor de Bonificación FB se obtiene como producto de los valores anteriormente citados.

$$FB = C1 * C2 * C3$$

Partiendo de este valor se calcula el factor de bonificación efectivo (FBE) recurriendo a la gráfica correspondiente del manual. Con este valor se puede corregir el MPPD (Daño Máximo Probable a la Propiedad), para obtener el valor real:

$$MPPD \text{ (real)} = MPPD * FBE$$

Con este valor se puede obtener, recurriendo a la gráfica correspondiente del manual, el MPDO o número de días de interrupción de la actividad industrial que supondría un accidente en la instalación en una situación real (considerando los sistemas de seguridad de la misma).

Por último con este valor y el valor de la producción mensual (expresado en unidades monetarias) se calcula el costo asociado a la interrupción de la actividad industrial, BI, durante estos días de acuerdo con:

$$\frac{MPDO}{30} * VPM * 0.7 = BI$$

donde,

VPM: es el valor de la producción mensual.

MPDO: número de la producción de días máximos probables de interrupción de la actividad industrial.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

El Índice de Incendio y Explosión encuentra su empleo como método de clasificación previa principalmente en grandes unidades o complejos (refinerías, complejos petroquímicos con varias unidades) en orden a identificar las áreas con mayor riesgo potencial, a las que se deben aplicar otro tipo de técnicas de identificación y cuantificación de riesgos.

RECURSOS NECESARIOS

Para el correcto desarrollo de la metodología expuesta, es imprescindible la siguiente documentación;

- Planos de localización de equipos (Plot Plant)
- Diagrama de flujo.
- Diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID)
- Hojas de especificaciones de equipos.
- Guía de cálculo de Índice DOW de Fuego y Explosión (actualmente en su sexta edición).

En función del gran número de parámetros que hay que manejar, y en función, asimismo, del número de unidades que el analista vaya a definir como objeto de estudio, puede ser recomendable la utilización de un sistema informático de apoyo.

Para la aplicación del método es necesario el conocimiento detallado de la mencionada Guía, así como apoyo de personal calificado conocedor de las condiciones de proceso y físicas de las instalaciones en estudio.

SOPORTE INFORMÁTICOS

Existen modelos informáticos que facilitan y aceleran la elaboración del Índice de Incendio y Explosión evitando los posibles errores en la consulta de las numerosas tablas y gráficas. Un ejemplo de este tipo de programa lo constituye el modelo INDICES (TEMA).

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Como se ha comentado inicialmente, la aplicación del método permitirá una ordenación, en función del riesgo asociado, de las unidades en que se haya dividido la instalación.

El método puede ser de gran utilidad como paso previo para centrar la atención del analista en las unidades más críticas del proceso y decidir posteriormente las que deben ser analizadas con mayor profundidad.

En cualquier caso, es conveniente no confundir la exactitud con la que el índice de DOW facilita valores tales como el Área de Exposición o el máximo Daño a la Propiedad, con los valores que puedan determinarse por aplicación de herramientas mucho más complejas y avanzadas, como puede ser los modelos de simulación y vulnerabilidad.

1.2.2 ÍNDICE DE MOND

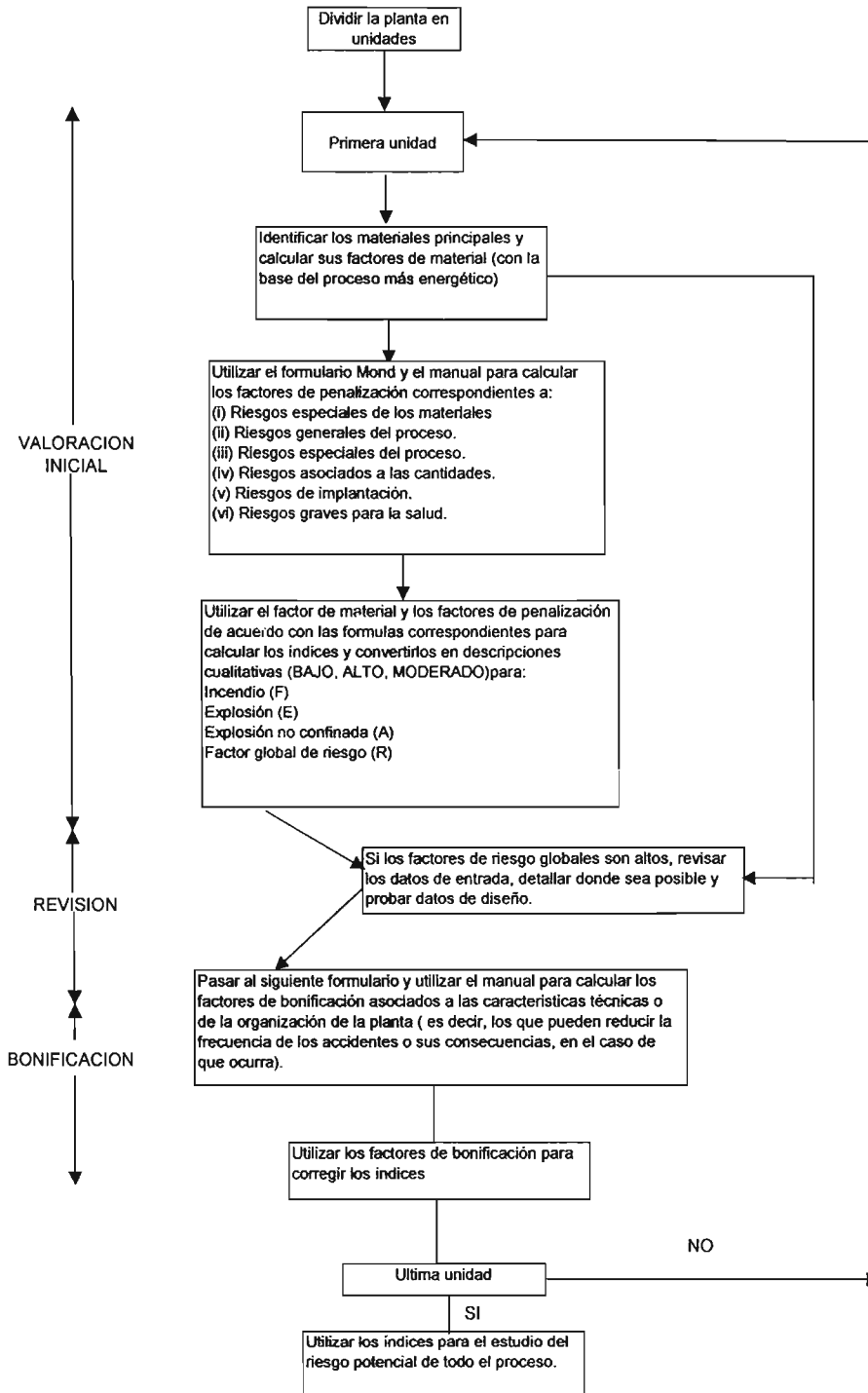
Este método fue desarrollado por técnicos de Imperial Chemical Industries PLC (ICI) a partir del índice DOW. La primera versión fue publicada en 1979 y la segunda, que se describe a continuación, en 1985.

Ya se ha comentado anteriormente que la diferencia frente al Índice de DOW, es que el Índice de MOND considera la toxicidad de las sustancias presentes, y este parámetro es introducido como un factor independiente, considerando los efectos de las sustancias tóxicas por contacto cutáneo o por inhalación.

Para un conocimiento exhaustivo del método, como en el caso del índice de DOW, se recomienda consultar la Guía publicada por ICI. Como comentario general, y referido al índice de DOW, hay que indicar que el índice de MOND es, en general, más detallado, tiene en cuenta mayor número de parámetros de riesgo y bonificaciones y, finalmente, facilita una clasificación de unidades en función del riesgo.

Un diagrama descriptivo del método se incluye en la figura 1.4

FIGURA 1.4 ESQUEMA GENERAL DEL METODO DEL INDICE MOND



ÁMBITO DE APLICACIÓN

Se seleccionará este método cuando en la instalación a estudiar la presencia de productos tóxicos se importante.

RECURSOS NECESARIOS

En comparación con el índice de DOW el método MOND utiliza menos recursos gráficos, siendo necesario un mayor número de cálculos para determinar el mayor número de parámetros a considerar.

Por ello, ya desde la publicación de la segunda edición en 1985, se anunciaba la disponibilidad de una versión informática.

La documentación y información necesarias son las mismas que las comentadas para el índice de DOW.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Caben los mismos comentarios que para el índice de DOW, con la consideración, en este caso, de que se tiene en cuenta mayor número de parámetros.

En cualquier caso, los valores obtenidos facilitan la clasificación relativa de las unidades en que se haya dividido la instalación en estudio, facilitando la posterior aplicación de métodos más detallados.

CALCULO DE ÍNDICE DE MOND

En la tabla 1.4 de forma más detallada y de acuerdo con lo que especifica el manual del método (versión 1985) el proceso del cálculo del índice de MOND.

TABLA 1.4 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)

PRIMERA FASE DE CALCULO

Considera la unidad en su forma más básica con el número mínimo de controles necesarios para su operación normal. Se mide la energía de la unidad por unidad de peso de material.

Consiste en determinar:

- Material o mezcla principal (1):
- Factor de material (2) (B):

SEGUNDA FASE DE CALCULO

Considera los factores que pueden agravar el riesgo.

Consiste en ponderar cada uno de los siguientes ítems:

- RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (3) (M)

	Rango	Número de la variable (4)
1. Productos calientes	0 + 20	(m)
2. Dar lugar a gas combustible con agua	0 + 30	
3. Características de mezcla y dispersión	-60 + 100	
4. Puede inflamarse espontáneamente	30 + 250	
5. Puede polimerizar espontáneamente de forma rápida	25 + 75	
6. Sensibilidad a la ignición	-75 + 150	
7. Puede dar descomposición explosiva	75 + 125	
8. Puede dar lugar a detonación del gas	0 + 150	
9. Propiedades de la fase condensada	200 + 1500	
10. Otros	0 + 150	
Factor de riesgo especial del material (M)	Valor: suma del valor de estas diez terminos	

**TABLA 1.4 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
CONTINUA**

- RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (5) (P)

	Rango
1. Manipulación y cambios físicos únicamente	10 + 60
2. Características de la reacción	25 + 60
3. Reacciones batch	10 + 60
4. Multiplicidad de reacciones	25 + 75
5. Desplazamiento de material	0 + 150
6. Contenedores transportables	10 + 100

Factor de riesgo general del proceso (P)

Valor: suma del valor de estos seis terminos

- RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (5) (S)

	Rango	Nombre de la variable
1. Presión baja (< 15psia)	50 + 150	
2. Alta presión	0 + 150	(p) (6)
3. Temperatura baja		
3.1 Acero al carbono +10 °C a -25 °C	0 + 30	
3.2 Acero al carbono -25 °C	30 + 100	
3.3 Otros materiales	0 + 100	
4. Alta temperatura		
4.1 Material inflamable	0 + 35	
4.2 Resistencia del material	0 + 100	
5. Corrosión y erosión	0 + 400	
6. Fuga por juntas y cierres	0 + 60	
7. Vibración, fatiga, etc.	0 + 100	
8. Proceso/reacciones difíciles de controlar	20 + 300	
9. Operación cerca o en el rango de inflamabilidad	25 + 450	
10. Riesgo de explosión superior a un valor medio	40 + 100	
11. Riesgo de explosión de inflamabilidad	30 + 70	
12. Oxidantes potentes	0 + 100	
13. Sensibilidad del proceso a la ignición	0 + 400	
14. Riesgo de electricidad estática	10 + 200	

Factor de riesgos especiales del proceso (S)

Valor: suma del valor de estos catorce terminos

15: Desarrollo en sección 5 del manual.

16: Este valor se encuentra en los gráficos de la Figura 2.11

**TABLA 1.4 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
CONTINUA**

- RIESGOS ASOCIADOS A LAS CANTIDADES (7) (Q)

	Variable
1. Cantidad total de material (t)	K
2. Factor de cantidad	Q (8)

- RIESGOS ASOCIADOS A LA IMPLANTACION (9) (L)

Altura en metros H
Area de trabajo en m² N

	Rango
1. Diseño de la estructura	0 + 200
2. Efecto dominó	0 + 250
3. Bajo tierra	50 + 150
4. Superficie de drenaje	0 + 100
5. Otro	50 + 250

Factor de riesgo de implantación (L)

Valor: suma del valor de estos cinco terminos

- RIESGOS ASOCIADOS A DAÑOS GRAVES PARA LA SALUD (10) (T)

	Rango
1. Efecto sobre la piel	0 + 50
2. Efectos por inhalación	0 + 50

Factor de riesgos graves para la salud (T)

Valor: suma del valor de estos dos terminos

**TABLA 1.4 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
CONTINUA**

TERCERA FASE DE CALCULO. DETERMINACION DE LOS FACTORES DE BONIFICACION

A. RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTENCIÓN (11) (K1)

1. Recipientes a presión
2. Tanques verticales atmosféricos
3. Tuberías de transferencia:
 - 3.1 Esfuerzos de diseño
 - 3.2 Juntas y uniones
4. Detección y respuesta frente a una fuga
5. Alivio de presión de emergencia o tanques de vertido de emergencia

Factor de riesgos graves para la salud (K1)

Valor: producto del valor de estos cinco términos

B. RIESGOS ASOCIADOS AL CONTROL DEL PROCESO (12) (K2)

1. Sistemas de alarma
2. Suministros eléctricos de emergencia
3. Sistemas de refrigeración
4. Sistemas de inertización
5. Actividades de estudios de riesgos
6. Sistemas de seguridad de parada de la planta
7. Control por ordenador
8. Protecciones de los reactores
9. Procedimientos de operación
10. Supervisión de la planta

Factor de control del proceso (K2)

Valor: producto del valor de estos diez términos

C. ACTITUD CON RESPECTO A LA SEGURIDAD (13) (K3)

1. Implicación por parte de la dirección
2. Entrenamiento en seguridad
3. Procedimientos y mantenimiento de seguridad

Factor de actitud frente a seguridad (K3)

Valor: producto del valor de estos tres términos

**TABLA 1.4 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
CONTINUA**

D. PROTECCION CONTRA INCENDIOS (14) (K4)

1. Protección estructural contra el fuego
2. Barreras, muros corta fuego
3. Equipos de protección contra incendios

Factor de protección contra incendios (K4)

Valor: producto del valor de estos tres terminos

E. AISLAMIENTO (15) (K5)

1. Sistemas de cálculos
2. Ventilación

Factor de aislamiento de fugas (K5)

Valor: producto del valor de estos dos terminos

F. LUCHA CONTRA INCENDIOS (16) (K6)

1. Alarmas de incendio
2. Extintores manuales
3. Suministro de agua
4. Rociadores de agua o monitores
5. Instalaciones de espumógeno o inertización
6. Brigada contra incendio
7. Pactos de ayuda mutua en caso de incendio
8. Ventilación de gases

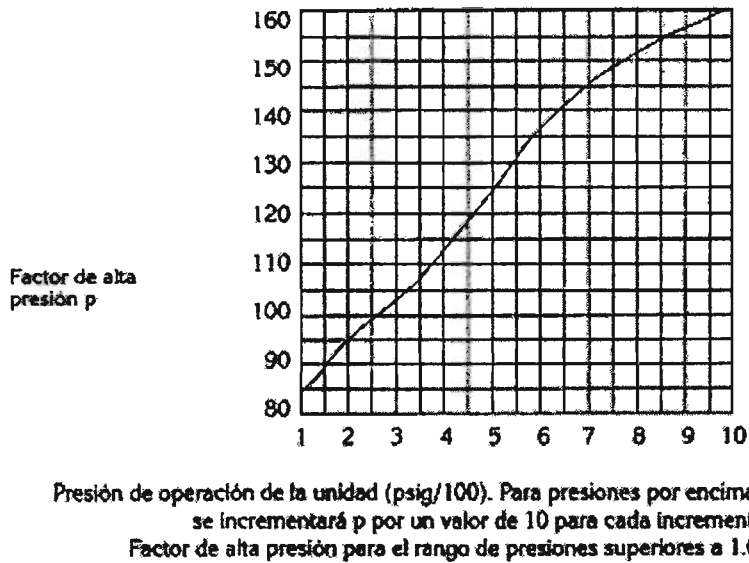
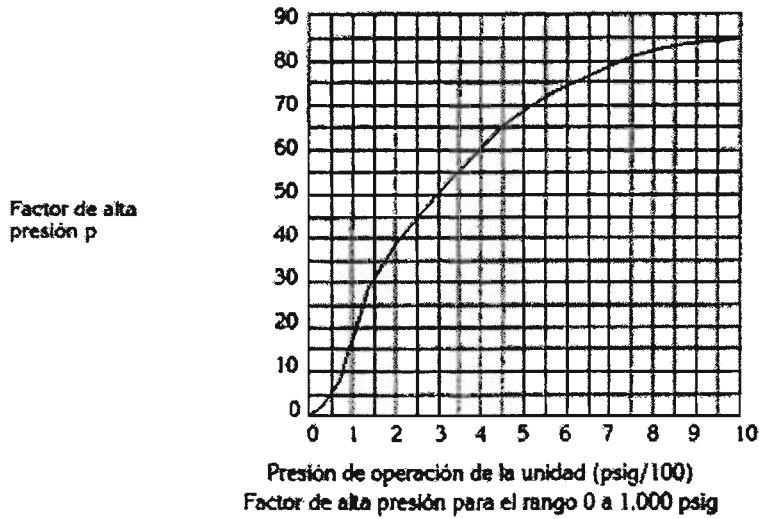
Factor de lucha contra incendios (K6)

Valor: producto del valor de estos ocho terminos

- (1) Desarrollo en sección 4 del manual.
- (2) Desarrollo en sección 5 del manual.
- (3) Desarrollo en sección 6 del manual.
- (4) Símbolo utilizado para referirse al ítem y posteriormente utilizado en las fórmulas de cálculo de los índices. Así se representan las características de mezcla y dispersión del material, mientras que M representa el factor de riesgo especial del material.
- (5) Desarrollo en sección 6 del manual.
- (6) Este valor se encuentra en los gráficos de la figura 2.11
- (7) Desarrollo en sección 9 del manual.
- (8) Se calcula según el rango del material en toneladas de acuerdo con las gráficas de la figura 2.12.
- (9) Desarrollo en sección 10 del manual.
- (10) Desarrollo en sección 11 del manual.
- (11) Desarrollo en sección 16.1 del manual.
- (12) Desarrollo en sección 16.2 del manual.
- (13) Desarrollo en sección 16.3 del manual.
- (14) Desarrollo en sección 17.1 del manual.
- (15) Desarrollo en sección 17.2 del manual.
- (16) Desarrollo en sección 17.3 del manual.

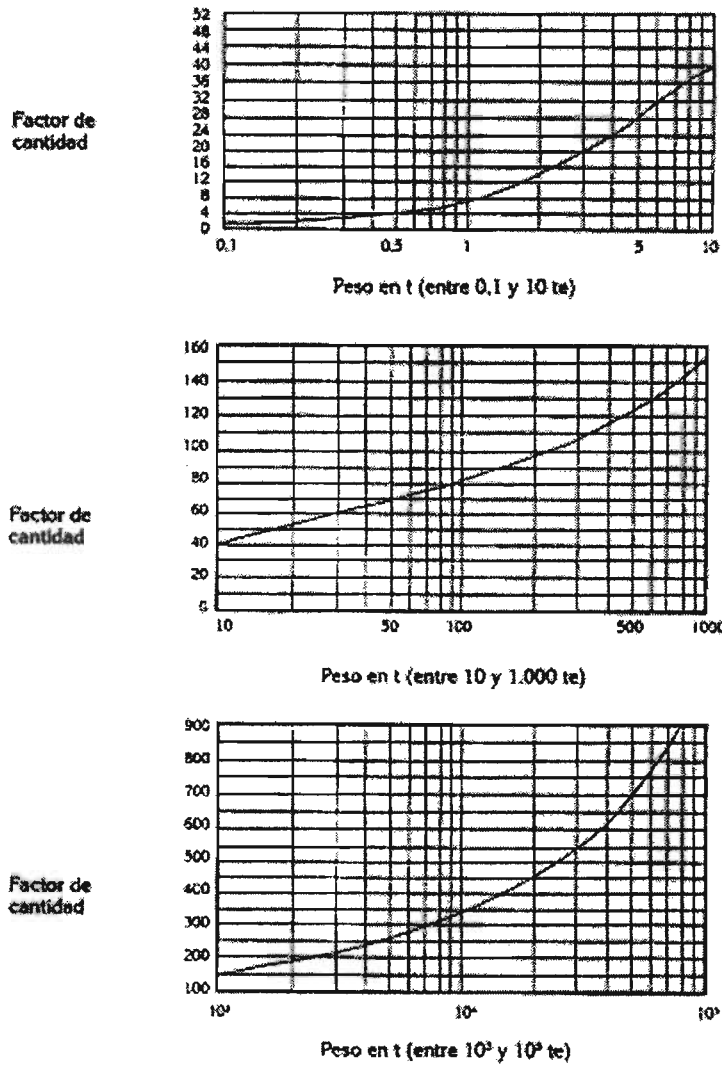
En las figuras 1.5 y 1.6, respectivamente, se incluye las gráficas a utilizar para determinar los factores de presiones alta (p) y de cantidad (Q).

FIGURA 1.5 CURVAS PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR P DE PRESION ALTA PARA EL METODO DE INDICE DE MOND



(1) Ver tabla 1.4.

FIGURA 1.6 CURVAS PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR Q DE CANTIDAD PARA EL METODO DE INDICE DE MOND



(1) Ver tabla 1.4.

Por último , en la tabla 1.5 se reseñan las ecuaciones a aplicar para evaluar los distintos índices en función de los factores definidos.

TABLA 1.5 ECUACIONES DEL METODO DEL INDICE DE MOND

- INDICE EQUIVALENTE DE DOW
(Valoración inicial y revisión)

$$D = B \times \left(1 + \frac{M}{100}\right) \times \left(1 + \frac{P}{100}\right) \times \left(1 + \frac{(S + Q - L + T)}{100}\right)$$

donde,

- B: Factor de material (ver tabla 2.6).
- M: Factor de riesgo especial del material (ver tabla 2.6).
- P: Factor de riesgos generales del proceso (ver tabla 2.6).
- S: Factor de riesgos especiales del proceso (ver tabla 2.6).
- Q: Factor de cantidad (ver tabla 2.6 y figura 2.12).
- L: Factor de riesgos asociados a la implantación (ver tabla 2.6).
- T: Factor de riesgos graves para la salud (ver tabla 2.6).

- INDICE DE INCENDIO
(Valoración inicial y revisión)

$$F = \frac{B \times K}{N}$$

donde,

- B: Factor de material (ver tabla 2.6).
- K: Cantidad total de material (ver tabla 2.6).
- N: Area de trabajo (ver tabla 2.6).

(Valor corregido)

$$F \times K1 \times K3 \times K5 \times K6$$

donde,

- F: Índice de incendio.
- K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).
- K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).
- K5: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).
- K6: Factor de lucha contra incendios (ver tabla 2.6).

- INDICE DE EXPLOSION INTERNA
(Valoración inicial y revisión)

$$E = 1 + \frac{(M + P + S)}{100}$$

donde,

- M: Factor de riesgo especial del material (ver tabla 2.6).
- P: Factor de riesgos generales del proceso (ver tabla 2.6).

TABLA 1.5 ECUACIONES DEL METODO DEL INDICE DE MOND CONTINUA

(Valor corregido)

$$E \times K2 \times K3$$

donde,

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE EXPLOSION NO CONFINADA**

(Valoración inicial y revisión)

$$A = B \times \left(1 + \frac{m}{100}\right) \times (1 + p) \times \frac{(Q \times H \times E)}{1.000} \times \frac{\{t(^{\circ}) + 273\}}{300}$$

donde,

B: Factor de material (ver tabla 2.6).

m: Características de mezcla y dispersión (ver tabla 2.6).

p: Factor de alta presión (ver tabla 2.6 y figura 2.11).

Q: Factor de cantidad (ver tabla 2.6 y figura 2.12).

H: Altura (ver tabla 2.6).

E: Índice de explosión interna anteriormente definido.

t: Temperatura de operación.

(Valor corregido)

$$A \times K1 \times K2 \times K3 \times K3$$

donde,

A: Índice de explosión no confinada.

K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

K3: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE RIESGO GLOBAL**

(Valoración inicial y revisión)

$$R = D \times 1 + (0.2 E \times \sqrt{A \times F})$$

donde,

D: Índice equivalente de DOW.

E: Índice de explosión interna.

A: Índice de explosión no confinada.

F: Índice de incendio.

(Valor corregido)

$$R \times K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5 \times K6$$

donde,

K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

K4: Factor de protección contra incendios (ver tabla 2.6).

K5: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).

K6: Factor de lucha contra incendios (ver tabla 2.6).

- **CALCULO DE INDICES**

Índice	Valor inicial ¹		Valor revisado ²		Bonificación ⁴	
	Valor ³	Categoría ³	Valor	Categoría	Valor	Categoría
D						
F						
E						
A						
R						

1. Este valor de los índices es la correspondiente a la primera evaluación de los parámetros con tendencia pesimista en la asignación de los parámetros.
2. Este valor de los índices corresponde a una estimación corregida más real del valor de los parámetros.
3. Este valor de los índices toma en consideración los elementos de protección de los que dispone la instalación.
4. Valor numérico obtenido para el índice.
5. Categoría de índice de acuerdo con la clasificación reseñada en la tabla 1.6

**TABLA 1.6 METODO DEL INDICE DE MOND.
CLASIFICACION DE LOS INDICES**

- INDICE DE EXPLOSION INTERNA (E)

Rango	Categoría
0-1,5	Leve
1,5-2,5	Bajo
2,5-4	Moderado
4-6	Alto
> 6	Muy alto

- INDICE DE EXPLOSION NO CONFINADA (A)

Rango	Categoría
0-10	Leve
10-30	Bajo
30-100	Moderado
100-400	Alto
400-1700	Muy alto
> 1700	Extremo

- INDICE DE INCENDIO (F)

Rango	Categoría
0-2	Leve
2-5	Bajo
5-10	Moderado
10-20	Alto
20-50	Muy alto
50-100	Intenso
100-250	Extremo
> 250	Muy extremo

- INDICE DE RIESGO GLOBAL (R)

Rango	Categoría
0-20	Leve
20-30	Bajo
100-500	Moderado
500-1100	Alto (grupo 1)
1100-2500	Alto (grupo 2)
2500-12500	Muy alto
12500-65000	Extremo
> 65000	Muy extremo

1.3 OTROS METODOS DE APOYO

1.3.1 REVISIÓN / AUDITORIA DE SEGURIDAD (SAFETY REVIEW)

Bajo este epígrafe se incluirían todas las inspecciones que normalmente se realizan y consideran como «Auditorias de Seguridad» en sus diferentes acepciones: desde las de verificación de las condiciones de las instalaciones, hasta las de organización y procedimientos, o de control de pérdidas.

Existen numerosas auditorias publicadas. Entre otras se puede citar la Clasificación Internacional cinco estrellas (Asociación para la Prevención de Accidentes) que consta de veinte elementos de auditoria distintos, cubriendo aspectos muy variados de gestión, seguridad e higiene y control total de pérdidas.

DESCRIPCIÓN

La finalidad principal es verificar que las instalaciones, en operación y mantenimiento siguen las normas establecidas.

Estas revisiones de seguridad deben entenderse siempre como un complemento de las inspecciones rutinarias y deben partir siempre de un espíritu de colaboración para conseguir la operación de la planta en las mejores condiciones posibles de seguridad.

La labor incluye el desarrollo de entrevistas con personas de todo nivel: operadores de planta, mantenimiento, ingeniería, seguridad, gerencia, dirección general. Ello permite contemplar las situaciones desde diferentes y a veces contrastantes puntos de vista.

Generalmente, como instrumentos de apoyo de la labor realizada, pueden utilizarse métodos ya descritos tales como listas de chequeo, partes del método What If y otras.

El resultado de estas inspecciones son recomendaciones para mejorar las deficiencias observadas.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Estas revisiones son comúnmente empleadas en plantas de proceso. Ello no obsta, sin embargo, para que tengan su aplicación en plantas piloto, laboratorios, almacenamientos, y puedan ser utilizadas en diferentes fases de su vida (proyectos, construcción, puesta en marcha, operación, desactivación).

Estas diferentes fases sirven para cubrir los siguientes objetivos básicos:

- Cumplimiento de las normas de los procedimientos de operación y mantenimiento.
- Detección de nuevos riesgos.
- Revisión de nuevos procedimientos.
- Detección de cambios en equipos o procesos que pueden introducir nuevos riesgos.
- Introducción de nuevas tecnologías frente a riesgos existentes.

Es normal que en plantas de alto riesgo se realicen auditorias cada 2 ó 3 años, mientras que en otras de riesgo menor se llevan a cabo cada 5 ó 10 años.

RECURSOS NECESARIOS

Para llevar a cabo una auditoria completa, el equipo auditor, compuesto por un total de 2 a 5 personas, debe tener acceso a todas las normas aplicables, descripción de procesos, diagramas de proceso, diagramas de tuberías e instrumentación, procedimientos de puesta en marcha, parada, operación normal y emergencias, informes sobre accidentes, informes de mantenimiento, pruebas de presión, inspecciones de recipientes a presión, características físico-químicas (toxicidad, reactividad, etc.).

Los inspectores deben estar familiarizados con las normas y procedimientos y, eventualmente, pueden precisarse especialistas en algunos puntos (electricidad, instrumentación).

Una auditoría de una instalación completa puede requerir una labor de campo de hasta una semana.

Existen métodos clasificados para el desarrollo de inspecciones o auditorias. Muchos de ellos son de uso interno de compañías y otros son de amplia difusión como puede ser, el ya citado de Clasificación Internacional de cinco estrellas (APA).

SOPORTES INFORMÁTICOS

Normalmente no se utiliza soporte informático en la realización de esta técnica.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Son similares a los enumerados para los *check list*.

1.4 RESUMEN

En la tabla 1.7 se resumen todos los métodos descritos con sus características principales.

TABLA 1.7 RESUMEN DE METODOS Y CARACTERISTICAS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS

Método	Ambito de Aplicación	Recursos humanos / materiales	Soporte informáticos	Ventajas	Inconvenientes
Análisis histórico de accidentes	Identificación de accidentes. En algun caso proporciona orientación cuantitativa de la probabilidad. Util para productos e instalaciones de amplia difusión.	Consulta de bancos de datos. Recogida de información: publicaciones, revistas especializadas, informes industriales, informes oficiales.	OSIRIS 1, OSIRIS 2, FACTS, SONATA, MARS	Técnica poco costosa	A menudo los datos de accidentes son insuficientes.
Check list	Aplicable a todas las fases de un proyecto: diseño, construcción, puesta en marcha, operación y paradas y mantenimiento.	La preparación ha de ser realizada por personas de gran experiencia. Es preciso disponer de las normas o estándares de referencia. Buen conocimiento del sistema o planta. La realización no requiere gran experiencia pero si el análisis de los resultados	Formatos recogidos de los datos.	Permite comprobar con detalle el estado de una instalación	Verificar el cumplimiento de un reglamento o procedimiento para una instalación
Análisis preliminar de riesgos	Se utiliza en fase de diseño preliminar de nuevas instalaciones	Se debe disponer de: diseño básico, especificaciones de equipos, especificaciones de materiales.	-----	Técnica poco costosa	No adecuado para instalaciones existentes.
What If ...?	Aplicable a modificaciones o instalaciones existentes	Se debe disponer de: diseño detallado, datos de operación mantenimiento, conocimiento profundo de la instalación.	-----	-----	Técnica más general que el HAZOP, no tiene una sistemática tan exhaustiva. Técnica que requiere inversión de tiempo y equipo.
HAZOP	Aplicable a modificaciones o instalaciones existentes, así como a fase de diseño avanzado.	Se debe disponer de: diseño detallado, datos de operación / mantenimiento, conocimiento profundo de la instalación, equipo.	Códigos informáticos de registro de las sesiones, recomendaciones, etc. (HAZSEC, HAZTRAC, HAZOP, etc)	-----	Técnica que requiere una mayor inversión de tiempo. Análisis muy exhaustivo de la instalación.
FMEA	Aplicable en fases de: diseño, construcción, operación, previo a árboles de fallos.	Información necesaria similar a What If ...? y HAZOP	-----	Método menos costoso que HAZOP	Menos exhaustivo.

TABLA 1.7 RESUMEN DE METODOS Y CARACTERISTICAS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS (CONTINUA)

Método	Ámbito de Aplicación	Recursos humanos / materiales	Soporte informáticos	Ventajas	Inconvenientes
FMEAC	Ídem FMEA	Ídem FMEA	-----	Incluye una valoración cualitativa de la gravedad	-----
Índice DOW	Evaluación semicuantitativa de riesgo. Aplicable para la clasificación previa de áreas en instalaciones con varias unidades (refinerías, complejos petroquímicos)	Se debe disponer de. Planos de ubicación, diagramas de flujo, diagramas de tuberías e instrumentación, guía de cálculo.	Programas facilitan la labor de evaluación (INDICE, etc)	Permite una clasificación previa de área y unidades	La precisión de los resultados obtenidos con fines de identificación de riesgos es muy poca.
Índice MOND	Ídem Índice DOW	Lo mismo que el índice DOW. Comparativamente utiliza menos recursos gráficos.	-----	Ídem que el Índice DOW. Tiene en cuenta la toxicidad de los productos	Ídem que el Índice DOW
Revisión auditoría de seguridad	Puede tener objetivos muy variados. Generalmente se enfoca bajo una óptica monográfica: cumplimiento de normativa o legislación, revisión de procedimientos, gestión de seguridad, control de pérdidas	Se debe disponer de: normas internas de instalaciones, procedimientos de operación, procedimientos de emergencia, documentación de equipos, permisos de trabajo, etc.	-----	Ídem que Índice DOW. Tiene en cuenta la toxicidad de los productos. Permite analizar las instalaciones o la organización con gran detalle.	El enfoque contempla únicamente un aspecto (normativa, legislación, etc)

2 METODOS PARA LA EVALUACIÓN CUALITATIVA DE FRECUENCIAS DE OCURRENCIA.

La evaluación cualitativa de las frecuencias de ocurrencia, se puede realizar mediante dos enfoques fundamentales distintos:

1. Mediante una valoración semicuantitativa, que sin entrar en el análisis exhaustivo de las causas, puede asignar un nivel o rango de probabilidad a los accidentes. La metodología de análisis de riesgos es la desarrollada por el UCSIP (*Union des Chambres Syndicales de l'Industrie du Pétrole*), para las industrias del petróleo y refino; consta de dos apartados semicuantitativos en los cuales se ponderan las frecuencias y consecuencias de determinados accidentes. En este capítulo se expone la parte correspondiente a frecuencias, mientras que en el siguiente, se indica la parte relativa a consecuencia. Esta metodología fue desarrollada en Francia pero su aplicación ha sido mínima. Se describe ya que constituye una referencia histórica obligada. Con las correspondientes adaptaciones se puede emplear para la industria química en general.
2. Mediante la construcción y evaluación cualitativa de los árboles de fallos y eventos. A través de esta técnica se puede realizar un estudio exhaustivo de las causas que conducen a un accidente, así como una valoración cualitativa de las que tendrán mayor peso en la frecuencia resultante final.

2.1 ÍNDICES DE FRECUENCIA

2.1.1 MÉTODO UCSIP

DESCRIPCIÓN

En el método UCSIP, los riesgos considerados, se caracterizan por un valor de probabilidad semicuantitativo.

El método propone una escala de ocurrencia en seis niveles:

Nivel 1: acontecimiento improbable. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia inferior a 10^{-10} por hora.

Nivel 2: acontecimiento extremadamente raro. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad comprendido entre 10^{-10} y 10^{-8} por hora.

Nivel 3: acontecimiento raro. Corresponde en términos cuantitativos da una probabilidad comprendida entre 10^{-8} y 10^{-6} por hora.

Nivel 4: acontecimiento posible, pero poco frecuente. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia comprendida entre 10^{-6} y 10^{-4} por hora.

Nivel 5: acontecimiento frecuente. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia superior a 10^{-4} por hora.

Nivel X: acontecimiento al que no se puede atribuir una probabilidad (atentado, etc.)

El método consiste en determinar un factor de seguridad (FS) sobre la base de tres valores:

(PR) Participación en el riesgo del sistema, calculado en función de seis parámetros (P1j) que caracterizan el sistema y que tienen asignada una determinada ponderación entre 0 y 5.

(RE) Importancia del riesgo en operación, calculado en función de seis parámetros (P2j) que caracterizan la operación del sistema y que tienen asignadas una determinada ponderación entre 0 y 5

(NG) Nivel de gravedad, valor que mide la magnitud de las consecuencias y que adopta un valor entre 0 y 6.

Según el valor de FS se asigna un determinado nivel de probabilidad.

El esquema lógico de la metodología está representado en la figura 2.1. Los parámetros P1j y P2j pueden adoptar según el caso sólo algunos de los valores marcados entre 1 y 5.

FIGURA 2.1 METODO UCSIP. ESQUEMA PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE PROBABILIDAD

Parametro	Significado	Valor asignado según el caso	
P21	Frecuencia de inspecciones, controles, mantenimiento	Cada 3 meses o más	1
		Cada 6 meses	2
		Cada año	3
		Cada 2 años	4
		Cada 3 años o menos	5
P22	Proximidad con equipo con llama descubierta	Más de 500 metros	1
		Entre 200 y 500 metros	2
		Entre 100 y 200 metros	3
		Entre 30 y 100 metros	4
		Menos de 30 metros	5
P23	Frecuencia de los transitorios, arranques, movimientos	Menos de 5 veces al año	1
		De 5 a 10 veces al año	2
		De 10 a 20 veces al año	3
		De 20 a 30 veces al año	4
		Más de 30 veces al año	5
P24	Detección con alarma del peligro	Sí	1
		No	3
P25	Toma en cuenta el peligro:	A + B + C	1
		A) Procedimiento especial	2
		B) Medios fijos de prevención	3
		C) Medios fijos de protección	4
		No	4
P26	Vibraciones	No	1
		Sí + dispositivo de amortiguación	2
		Sí + seguimiento	3
		Sí	4

(1) Valores posibles para P1j y P2j de acuerdo con tablas 2.1 y 2.2.

(2) PR = Coeficiente de importancia del riesgo en operación.

(3) RE = Participación en el riesgo del sistema.

(4) Mide la magnitud de las consecuencias posibles mediante una clasificación entre 6 niveles de 0 a 5.

(5) FS = Factor de Seguridad.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Estos métodos encuentran su aplicación cuando no sea preciso análisis exhaustivo de las causas de los accidentes y basta con una idea del orden de magnitud de la frecuencia con que cabe esperar dichos accidentes.

RECURSOS NECESARIOS

Es necesario disponer de la descripción completa del método y es preciso un cierto grado de experiencia en su aplicación.

SOPORTES INFORMÁTICOS

UCSIP publica el método descrito en un soporte informatizado.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Precisa una menor dedicación de tiempo que el desarrollo y cuantificación mediante árboles de fallos y eventos.

No se realiza un análisis sistemático de causas que conducen al accidente por lo que se pierde la valiosa información que se recoge en este tipo de estudio, si bien el método toma en consideración los "conjuntos mínimos de fallos".

Este método no permite evaluar el impacto de las posibles mejoras que se pueden incorporar a un sistema o circuito determinado.

Procedimiento de cálculo

La tabla 2.1 agrupa las definiciones de los doce parámetros (P_{1j} , P_{2j} siendo $j = 1,6$) y de los criterios de asignación de valores entre 1 y 5 para cada uno de ellos.

TABLA 2.1 METODO UCSIP. PARAMETROS P1j PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

Parametro	Significado	Valor asignado según el caso	
P21	Frecuencia de inspecciones, controles, mantenimiento	Cada 3 meses o más	1
		Cada 6 meses	2
		Cada año	3
		Cada 2 años	4
		Cada 3 años o menos	5
P22	Proximidad con equipo con llama descubierta	Más de 500 metros	1
		Entre 200 y 500 metros	2
		Entre 100 y 200 metros	3
		Entre 30 y 100 metros	4
		Menos de 30 metros	5
P23	Frecuencia de los transitorios, arranques, movimientos	Menos de 5 veces al año	1
		De 5 a 10 veces al año	2
		De 10 a 20 veces al año	3
		De 20 a 30 veces al año	4
		Más de 30 veces al año	5
P24	Detección con alarma del peligro	Sí	1
		No	3
P25	Toma en cuenta el peligro: A) Procedimiento especial B) Medios fijos de prevención C) Medios fijos de protección	A + B + C	1
		B	2
		C	3
		No	4
P26	Vibraciones	No	1
		Sí + dispositivo de amortiguación	2
		Sí + seguimiento	3
		Sí	4

Se definen dos coeficientes a partir de los coeficientes de los doce parámetros:

- A partir de los valores de parámetro P11 a P16 (ver tabla 2.1, ultima columna), que define el tamaño o los estados representativos del sistema estudiado, se define (PR), coeficientes de participación en el riesgo del sistema, que se expresa como:

$$PR = \frac{\sum_{j=1}^6 P2j}{30} \times 100 (\%)$$

El coeficiente PR puede adoptar valores entre un mínimo de 30 % y un máximo de 90%

- b. A partir de los parámetros P21 a P26 (ver tabla 2.2, última columna), que define el tamaño o los estados representativos de la operación del sistema estudiado, se define (RE), coeficientes de importancia del riesgo en operación, que se expresa como:

$$PR = \frac{\sum_{j=1}^6 P2_j}{30} \times 100 (\%)$$

El coeficiente RE puede adoptar valores entre un mínimo de 20% y un máximo de 86%.

TABLA 2.2 METODO UCSIP. PARAMETROS P2j PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

Parametro	Significado	Valor asignado según el caso	
P21	Frecuencia de inspecciones, controles, mantenimiento	Cada 3 meses o más	1
		Cada 6 meses	2
		Cada año	3
		Cada 2 años	4
		Cada 3 años o menos	5
P22	Proximidad con equipo con llama descubierta	Más de 500 metros	1
		Entre 200 y 500 metros	2
		Entre 100 y 200 metros	3
		Entre 30 y 100 metros	4
		Menos de 30 metros	5
P23	Frecuencia de los transitorios, arranques, movimientos	Menos de 5 veces al año	1
		De 5 a 10 veces al año	2
		De 10 a 20 veces al año	3
		De 20 a 30 veces al año	4
		Más de 30 veces al año	5
P24	Detección con alarma del peligro	Sí	1
		No	3
P25	Toma en cuenta el peligro: A) Procedimiento especial B) Medios fijos de prevención C) Medios fijos de protección	A + B + C	1
		B	2
		C	3
		No	4
P26	Vibraciones	No	1
		Sí + dispositivo de amortiguación	2
		Sí + seguimiento	3
		Sí	4

Esto permite trazar un diagrama donde se representa en abcisas la participación en el riesgo del sistema y en ordenadas la importancia del riesgo en operación.

Se traza en este diagrama la recta que pasa por los puntos (RE = 100, PR = 0) y (RE = 0, PR = 100).

Esta recta es la denominada "recta de inseguridad" y se caracteriza por el factor de seguridad FS = 1. Representa el conjunto de puntos para los que:

$$RE + PR = 100\%$$

Si se calcula el riesgo total (R_{tot}) mediante la expresión:

$$R_{tot} = RE + PR$$

Cualquier recta situada a la derecha de la recta la inseguridad está caracterizada por un factor de seguridad FS inferior de 1.

Cualquier recta situada a la izquierda de la recta de inseguridad está caracterizada por un factor de seguridad FS superior a 1.

Sobre la base del riesgo total R_{tot} se fijan mediante un axioma y cuatro postulados los niveles de probabilidad siguientes:

$R_{tot} > 100\%$	NP=5 FS<1	(Axioma)
$80 < R_{tot} < 100$	NP=4 $1 < FS < 1,25$	(Postulado 1)
$55 < R_{tot} < 80$	NP=3 $1,25 < FS < 1,82$	(Postulado 2)
$35 < R_{tot} < 55$	NP=2 $1,82 < FS < 2,85$	(Postulado 3)
$R_{tot} > 35\%$	NP=1 FS>2,85	(Postulado 4)

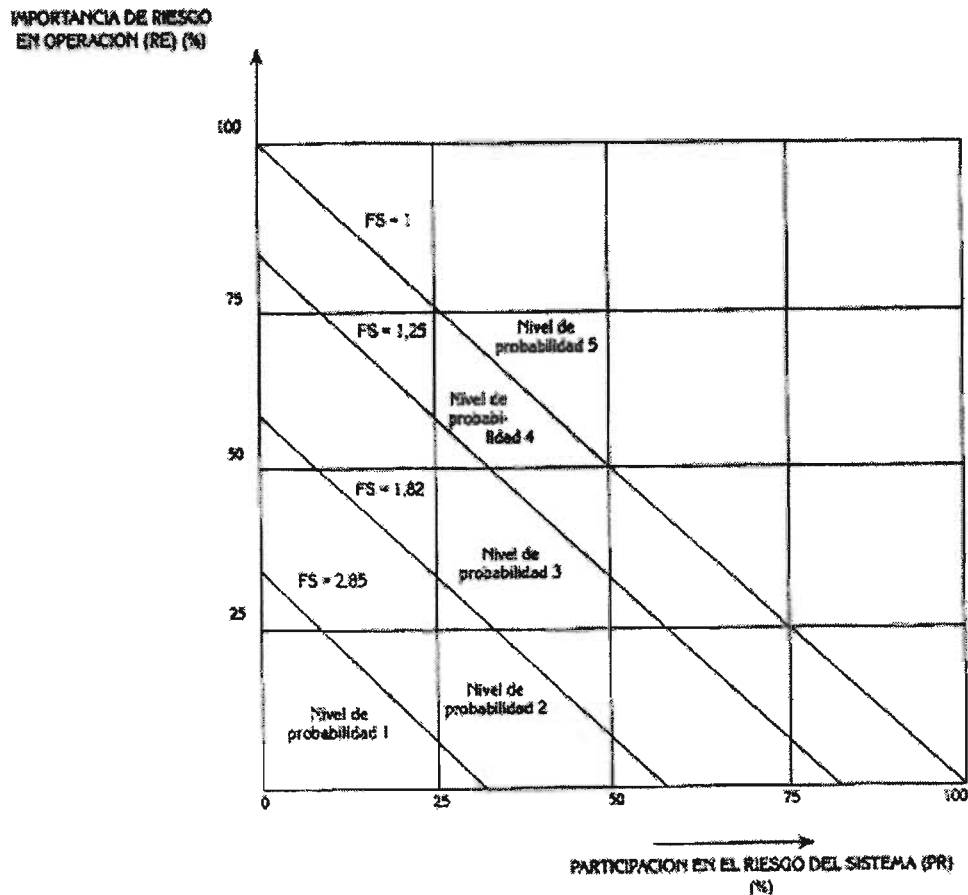
Donde:

NP = nivel de probabilidad

FS = factor de seguridad

Se establece entonces una relación entre el nivel de probabilidad NP y el factor de seguridad FS, que se ilustra en el diagrama de la figura 2.2, donde las diversas zonas de nivel de probabilidad 5, 4, 3, 2, y 1 están delimitadas por las rectas de factor de seguridad FS = 1; 1,25; 1,82, y 2,85

FIGURA 2.2 METODO UCSIR FACTORES DE SEGURIDAD



Para un punto de coordenadas (PR, RE), característico de un sistema estudiado, se expresará el factor de seguridad FS bajo forma de una ecuación en función del nivel de gravedad (NG) inherente al sistema estudiado y al riesgo total mínimo, por otro lado:

$$FS = \frac{30 * [(0,0945 * NG + 0,7275) - (0,122/NG - 0,02970)]}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^6 P_{ij} - 4,5}$$

Donde,

NG = nivel de gravedad mide la magnitud de las posibles consecuencias. Adquiere valores entre 0 y 6;

P_{ij} = representa la ponderación dada a los parámetros para la determinación de frecuencias. (ver tabal 2.1)

2.1.2 OTROS MÉTODOS

DESCRIPCIÓN

Estos métodos recurren a una asignación directa de la probabilidad de ocurrencia. Son métodos que para que alcancen un mínimo de precisión en la clasificación realizada, exigen en cualquier caso un análisis previo de las causas y fallos que conducen al accidente.

Su aplicación conduce a una clasificación de las probabilidades del siguiente tipo:

- I. Baja.- Probabilidad de ocurrencia considerada REMOTA durante el tiempo de vida expresado de la instalación asumiendo que se realiza una operación y mantenimiento usuales.
- II. Media.- Probabilidad de ocurrencia considerada POSIBLE durante el tiempo de vida esperado de la instalación,
- III. Alta.- Probabilidad de secuencia considerada suficientemente alta para asumir que el evento OCURRIRA por lo menos una vez durante el tiempo de vida esperado de la planta.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Se puede emplear esta técnica en un estudio preliminar como método de selección del tipo de accidentes a evaluar con mayor detalle.

RECURSOS NECESARIOS

La aplicación de estos métodos es sumamente subjetiva y precisa una gran experiencia en su realización.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Normalmente no se utiliza soporte informático en la aplicación de esta técnica.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Puede ser un método de clasificación para instalaciones con gran número de equipos.

Para conseguir resultados coherentes, es necesaria gran experiencia al aplicar los criterios de clasificación.

2.2 ÁRBOLES DE FALLOS

DESCRIPCIÓN

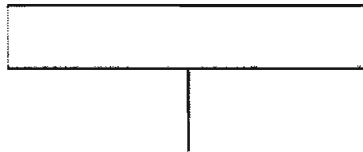
La técnica del árbol de fallos nació en 1962 con su primera aplicación a la verificación de la fiabilidad de diseño del cohete Minuteman. Posteriormente ha sido aplicada sobre todo inicialmente en el campo nuclear y posteriormente en el campo químico, en estudios como el de Rijmond. Los árboles de fallos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados tanto cualitativos como cuantitativos. En este apartado se describe únicamente la técnica en su aplicación cualitativa.

Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. De esta manera, se puede apreciar de forma

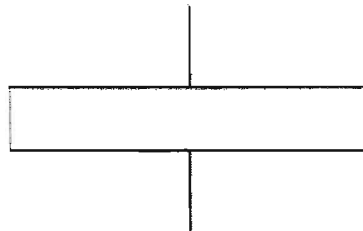
cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado suceso *TOP* en *sucesos intermedios* hasta llegar a *sucesos básicos*.

Suceso TOP: Ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo que se representa mediante un rectángulo. Tiene que estar claramente definido



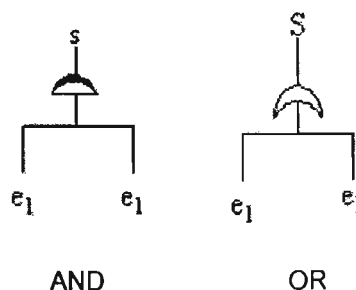
Sucesos intermedios: Son los sucesos intermedios que son encontrados en el proceso de descomposición y que a su vez pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallos en rectángulos.



Sucesos básicos: Son los sucesos terminales de la descomposición. Pueden representar cualquier tipo de suceso: sucesos de "fallos", error humano ... o sucesos de "éxito" ocurrencia de un evento determinado. Se representan en círculos en la estructura del árbol.

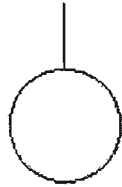
En el proceso de descomposición del árbol se recurre a una serie de *puertas lógicas* que representan los operadores del álgebra de sucesos. Los dos tipos más elementales corresponden a las puertas AND y OR cuyos símbolos se indican a continuación. La puerta OR se utiliza para indicar un "o" lógico: significa que la salida lógica *S* ocurrirá siempre y cuando ocurra por lo menos una de las dos entradas lógicas e_1 o e_2 .

La puerta AND se utiliza para indicar un "y" lógico. Para que ocurra la salida lógica *S* es necesario que ocurran conjuntamente las dos entradas lógicas e_1 y e_2 .

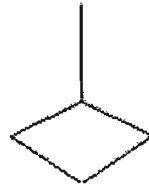


Se suelen numerar las puertas del árbol para facilitar su identificación. En la tabla 2.3 extracto del *Fault Tree Handbook*, 1987 se indican otros tipos de puertas lógicas (menos utilizados) y su simbología.

Sucesos no desarrollados: Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y se tratan como sucesos básicos.



SUCESO BASICO





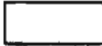


SUCESO NO
DESARROLLADO






En la técnica del árbol de fallos cabe destacar dos fases bien diferenciadas: la primera consiste en la elaboración del árbol y la segunda en el análisis de los resultados y en su tratamiento.

TABLA 2.3 SIMBOLOGIA DEL ARBOL DE FALLOS



SUCESOS BASICOS

	SUCESO BASICO-, suceso básico que no requiere posterior desarrollo
	SUCESO DE CONDICION-, condición específica o restricción que se aplica a cualquier puerta lógica (se utiliza principalmente con las puertas lógicas Y PRIORITARIO e INHIBIDO).
	SUCESO NO DESARROLLADO-, un suceso no se desarrolla porque sus consecuencias son despreciables o porque no hay información suficiente.
	SUCESO EXTERNO-, un suceso que normalmente ocurrirá.
	SUCESO INTERMEDIO-, un suceso de fallo que ocurre porque una o más causas anteriores ocurren a través de unas puertas lógicas.

PUERTAS LOGICAS

	El suceso de fallo de salida ocurre si las entradas se producen.
	El suceso de fallo de salida ocurre si el menos una de las entradas se produce.
	El suceso de fallo de salida ocurre si ocurre exactamente una de las entradas.
	Y PRIORITARIO-, el suceso de fallo de salida ocurre si todas las entradas se producen en una determinada secuencia (representada por el suceso CONDICION dibujado a la derecha de la puerta lógica).
	INHIBICION-, el suceso de fallo de salida ocurre si la entrada única ocurre en el caso en que se produzca una condición (representada por el suceso CONDICION dibujado a la derecha de la puerta lógica).

TRANSFERENCIAS

	Transferencia de entrada-, Indica que el árbol de fallos se desarrolla posteriormente donde aparece el símbolo de transferencia de entrada.
	Transferencia de salida-, Indica que esta posición del árbol debe relacionarse con el símbolo de transferencia de entrada.

Elaboración del árbol de fallos

En esta fase se integran todos los conocimientos sobre el funcionamiento y operación de la instalación con respecto del suceso estudiados.

El primer paso consiste en identificar el suceso "no deseado" o suceso TOP que ocupará la cúspide de la estructura gráfica representativa del árbol. De la definición clara y precisa del TOP depende todo el desarrollo del árbol.

Con este TOP se establece de forma sistemática todas las causas inmediatas que contribuyen a su ocurrencia definiendo así los sucesos intermedios unidos a través de las puertas lógicas. El proceso de descomposición de un suceso intermedio se repite sucesivas veces hasta llegar a los sucesos básicos o componentes del árbol.

Tratamiento cualitativo del árbol de fallos

Para ello se reduce la lógica del árbol hasta obtener las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la ocurrencia del propio TOP. Cada una de estas combinaciones, también llamadas conjunto mínimo de fallo (minimal cut – set en la nomenclatura anglosajona), corresponde a la intersección lógica (en Álgebra de Boole) de varios sucesos elementales.

Se obtendrá, por tanto, una lista de los conjuntos mínimos de fallos del siguiente tipo:

Conjunto mínimo de fallos número	Orden	Composición

En la primera columna se indicará el número de conjuntos mínimos de un orden determinado. Se define como orden de un componente el número de elementos que en él figuran. Por último, la tercera columna describirá la composición de los conjuntos mínimos.

Del estudio y análisis de esta tabla se pondrán sacar las conclusiones cualitativas sobre la importancia de cada suceso.

En un estudio cualitativo también se puede llevar a cabo un análisis de importancia que consiste en determinar los elementos más relevantes en la estructura, en este caso independientemente de la probabilidad que pudieran tener.

En este caso el análisis consiste en asignar a todos los componentes una tasa constante igual para todos a 0.5 y calcular la medida de importancia de Fussell Vesely definida como:

Medida de importancia de Fussell – Vesely: Se define el factor de importancia de Fussell – Vesely respecto de un componente C como cociente entre la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos que contienen a este componente y la probabilidad total (o suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos) Su expresión es:

$$\frac{\sum_{i=1}^N p(C_i)}{\sum_{i=1}^N p(C_i)}$$

donde:

C es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.

C_i es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.

P(C_i) es su probabilidad.

$C \in C_i$ representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i .

Este factor tiene en cuenta el número de conjuntos mínimos de fallos en que aparece un componente (frecuencia de aparición en el árbol) y los componentes a los cuales va asociado.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

La técnica por su grado de elaboración se aplica a sucesos relativamente complejos para los cuales intervienen muchos elementos y que se pueden descomponer.

RECURSOS NECESARIOS.

RECURSOS HUMANOS

La técnica es relativamente compleja y tiene que ser aplicada por un analista con una preparación adecuada en el uso del método. Requiere normalmente un proceso de revisión por un tercero si se quiere garantizar la calidad del estudio (por sus características se presta a interpretaciones distintas de los analistas, si no se fijan claramente los supuestos y criterios antes del estudio).

RECURSOS MATERIALES

La técnica del árbol de fallos es relativamente detallada y requiere un excelente conocimiento del sistema. Desde el punto de vista de documentación se requerirá toda la disponible: desde los diagramas de tuberías e instrumentación hasta los procedimientos de operación / mantenimiento seguidos, ya que el árbol de fallos incorpora multitud de aspectos.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Se recomienda el uso de un programa de evaluación de árboles de fallos, ya que para árboles, incluso con un número de componentes no muy elevado, el esfuerzo de evaluación es muy importante.

Se distinguen, básicamente, los programas disponibles en el mercado, en su forma de resolución del árbol de fallos. Se indican en la tabla 2.4.

TABLA 2.4 CODIGOS DE CALCULO DEL ARBOL DE FALLOS

Programa	Características
Análisis cualitativo: PREP, 1970 ELRAFT, 1971 MOCUS, 1972 TREEL, MICSUP, 1975 ALCUTS, 1975 SETS, 1974 FTAP, 1978	Calculan, los conjuntos mínimos de fallos o caminos de éxitos.
Análisis cuantitativo: KITT1, KITT2, 1970 SAMPLE, MOCARS, 1977 FRANTIC, 1977	Realiza el cálculo probabilísticos sobre la base de los conjuntos mínimos de fallos

TABLA 2.4 CODIGOS DE CALCULO DEL ARBOL DE FALLOS CONTINUA

Programa	Características
Evolución directa: ARMM, 1965 SAFTE, 1968 GO, 1968 Go, FAULT FINDER, 1977 NOTED, 1971 PATREC, 1974 PATREC MC, 1977 BAM, 1975 WAM - BAM, 1976 WAMCUT, 1978	Realizan la evolución numérica directa sin calcular previamente todos los conjuntos mínimos de fallos
Uso doble PL – MOD, 1977	Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo
Otros SALP-PC (1), 1987 MODULE (2), 1988 CARA (3), 1988 Etc.	

(1) Desarrollado por el JRC de Ispra.

(2) Desarrollado por el reactor *Safety Department of Korea Advanced Energy Research Institute*.

(3) Desarrollado por la compañía Technica.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

VENTAJAS

1. La técnica estudia las causas de los sucesos indeseados y permite evidenciar los puntos débiles de un sistema (conjuntos mínimos de fallos). Este aspecto es fundamental e materia de prevención de accidentes.
2. A través del análisis de importancia se conoce el peso relativo de los distintos elementos del sistema. Con ello se puede establecer una lista de prioridades a fijar para mejorar la instalación.
3. La técnica es un método para conocer a fondo un sistema.

INCONVENIENTES

1. Solo ofrece una orientación en cuanto a frecuencia de ocurrencia de sucesos basada en el número de causas necesarias para su ocurrencia.

2.3 ÁRBOLES DE SUCESOS

DESCRIPCIÓN

El árbol de sucesos o análisis de secuencias de sucesos es un método inductivo que describe la evolución de un suceso iniciador sobre la base de la respuesta de distintos sistemas tecnológicos o condiciones externas.

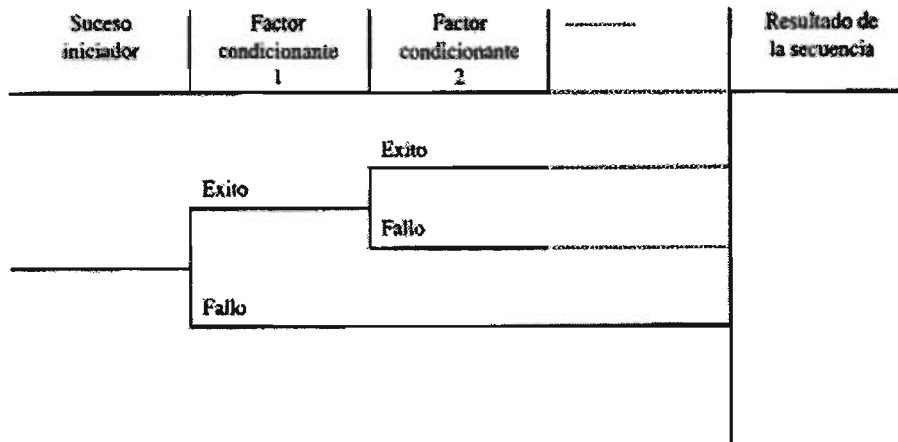
Partiendo del suceso iniciador y considerando los factores condicionantes involucrados, el árbol describe las secuencias accidentales que conducen a distintos eventos.

Construcción del árbol

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación se colocan éstos como cabezales de la

estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo (ver figura 2.3)

FIGURA 2.3 METODO DEL ARBOL DE SUCESOS. ESQUEMA GENERAL



Se obtienen 2^N combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos puede eliminar la posibilidad de otros reduciéndose así el número total de secuencias.

La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente si bien este criterio es difícil de aplicar en algunos casos.

La técnica así aplicada proporciona la lista de las secuencias accidentales posibles, número de elementos que la constituyen y tipo (éxito/fallo). De su estudio se podrán extraer las correspondientes conclusiones.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Utilizado para describir la evolución de sucesos iniciadores y definir así las secuencias accidentales.

RECURSOS NECESARIOS

La técnica es poco laboriosa y no requiere preparación específica en el uso de los conocimientos técnicos, si bien los analistas deberán conocer los fenómenos en juego.

SOPORTE INFORMÁTICOS

El uso de un código de ordenador se recomienda en el caso en que el número de sistemas y componentes sea muy elevado y se quiera llevar a cabo un estudio de los conjuntos mínimos de las secuencias accidentales (básicamente si existen dependencias funcionales en la estructura).

VENTAJAS / INCONVENIENTES

VENTAJAS

1. permite un estudio sistemático y exhaustivo de la evolución de un suceso.
2. Su aplicación es muy sencilla

Inconvenientes

1. Si el árbol es grande su tratamiento puede hacerse laborioso.

2.4 ANÁLISIS CAUSA – CONSECUENCIAS

Este método de análisis consiste en una combinación de árboles de fallos y árboles de sucesos. Posee la gran ventaja de la facilidad para ser usado como un buen recurso de comunicación, ya que los diagramas causa – consecuencia son extremadamente gráficos para mostrar las consecuencias de los accidentes postulados y causas elementales que los provocan.

DESCRIPCIÓN

Como combinación de los métodos de árboles de fallos y árboles de sucesos, el análisis causa – consecuencias es un método cualitativo, pero que puede ser desarrollado, asimismo, en su vertiente cuantitativa estableciendo las probabilidades de cada accidente y determinando sus consecuencias.

Posee la gran ventaja que permite moverse “ hacia delante “ con la técnica de los árboles de sucesos y “ Hacia tras “ a través de los árboles de fallos. Todo ello apoyado en un diagrama que permite al analista una gran comodidad de movimientos frente al problema contemplado.

La resolución de del diagrama causa – consecuencia es un listado de caminos críticos o secuencias de fallos (*minimal cut sets*) en línea de los determinados en los árboles de fallos que muestran las secuencias accidentales que provocarán la consecuencia accidental indeseada.

El proceso de desarrollo de este método de análisis es el siguiente:

- a. Selección de un suceso para ser evaluado:

Que puede ser, tanto un TOP indicado en los árboles de fallos, como un “suceso iniciador” de los árboles de sucesos.

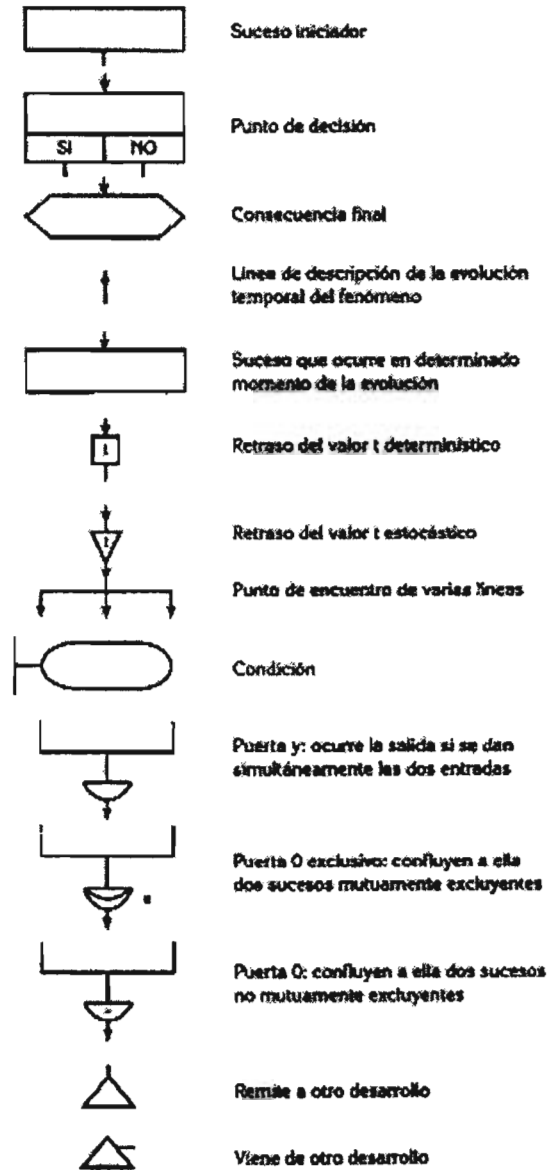
- b. Identificación de las funciones de seguridad y desarrollo de las secuencias accidentales:

Se desarrollan en paralelo, tanto la sucesión cronológica de sucesos, como los posibles fallos de los sistemas o funciones de seguridad existentes (sistemas de protección o prevención, actuaciones de los operadores, procedimientos, etc)

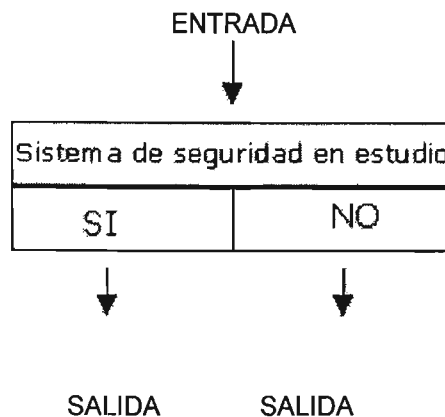
Una primera diferencia entre el análisis causa – consecuencia y los árboles de sucesos es la simbología utilizada en los diagramas.

El diagrama causa – consecuencia utiliza normalmente la simbología que se muestra en la figura 2.4

FIGURA 2.4 METODO DEL ANALISIS CAUSA/CONSECUENCIA. SIMBOLOGIA BASICA



En esta simbología destaca el símbolo de “toma de decisión adjunta”.



Permite analizar el funcionamiento de un sistema de seguridad (cortinas de agua, por ejemplo) que debería actuar en un punto de la secuencia accidental. La operación correcta o incorrecta del sistema analizado conducirá a dos situaciones absolutamente diferentes. En caso de operación de unas cortinas de agua accionadas frente a una fuga de gas tóxico para un confinamiento, el resultado de su correcta operación (SI) es el confinamiento de la fuga y, por lo tanto, la interrupción o disminución del suceso accidental. Si el sistema falló (NO), la nube de gas tóxico no se diluye y, por tanto, se extenderá fuera de los límites M confinamiento previsto.

- c. Desarrollo de suceso y de los fallos de funciones de seguridad para determinar las causas elementales:

Este paso consiste en la aplicación del análisis por árbol de fallos para cada uno de los sucesos iniciales o los fallos funcionales de seguridad identificados en el diagrama causa – consecuencia.

Es decir, cada fallo de las funciones de seguridad es utilizado, en definitiva, como un suceso iniciador o TOP.

- d. Determinación de los conjuntos mínimos de fallo (*Minimal Cut Sets*) de las secuencias accidentales:

Emplea la misma técnica de determinación de los *Minimal Cut Sets* que se expone en los árboles de fallos.

Para cada secuencia accidental identificada en el diagrama, se determinan estos conjuntos mínimos de fallos que serán los caminos críticos que serán necesarios que ocurran para que se produzca el suceso final indeseado.

- e. Evaluación de resultados:

Los resultados de aplicación de los diagramas causa – consecuencia son evaluados en las siguientes etapas: en primer lugar se establece un orden decreciente entre las consecuencias evaluadas, en función de su gravedad y de su importancia para la seguridad del entorno y de las propias personas e instalaciones; posteriormente, en un segundo paso, para cada secuencia accidental notable, se establece una clasificación de caminos críticos de fallo (*Minimal Cut Sets*) para determinar los fallos elementales o causas más importantes que pueden provocar los accidentes postulados.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Vista la gran semejanza entre el diagrama causa – consecuencia y las técnicas de árboles de fallos y árboles de sucesos, es claro que el ámbito de aplicación es idéntico en los casos mencionados.

En este sentido, es indudable que el momento más óptimo de aplicación de un análisis como el comentado es en la etapa de diseño y proyecto de cualquier instalación, lo que facilitará enormemente la implantación de las recomendaciones derivadas del estudio. Esta mayor viabilidad comentada no excluye, sin embargo, su aplicación en instalaciones existentes para evaluar en profundidad los sistemas de seguridad existentes.

RECURSOS NECESARIOS

Como conjunción de los métodos de árboles de fallos y árboles de sucesos, está claro que para el desarrollo de este tipo de análisis es necesaria una persona con conocimiento profundo de aplicación de las técnicas que ambos métodos requieren.

El resto de miembros del equipo deben conocer con probada experiencia las posibles interacciones entre los sistemas, equipos o elementos incluidos en el desarrollo de análisis.

Ello supone un equipo multidisciplinario en línea de los comentados como necesarios para el desarrollo del HAZOP u otros análisis semejantes.

En función de la complejidad de la instalación en estudio, y el nivel de detalle de los árboles de fallos exigido, el desarrollo de u estudio como el descrito puede implicar varios meses de dedicación de equipo de trabajo.

SOPORTES INFORMÁTICOS

En este caso es absolutamente necesario el apoyo en sistemas informáticos que faciliten los cálculos tanto de consecuencias accidentales como de desarrollo de los árboles de fallos o sucesos. La mayoría de los paquetes informáticos que permiten el tratamiento de los árboles de fallos suele ofrecer también un módulo para el estudio de los diagramas de causa – consecuencia.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Este método condensa las técnicas de árboles de fallos y de sucesos y se obtienen resultados que pueden ser seguidos fácilmente de forma gráfica.

Exige mayor control sobre su aplicación que las técnicas individualizadas de árbol de fallos y sucesos.

2.5 RESUMEN

En la tabla 2.5 se resumen las características de los métodos descritos en este capítulo.

TABLA 2.5 METODOS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS

Método	Ambito de aplicación	Recursos humanos / materiales	Soportes informáticos	Ventajas	Inconvenientes
UCSIP	En los casos en que no se requiere un estudio exhaustivo de las causas de los accidentes	Buen conocimiento del método	Se publica en soporte informático	Resultados fácilmente obtenible	No hay un estudio completo de causas
Clasificación cualitativas	Estudio preliminar	Gran experiencia en su uso	-----	Útil para instalación con muchos equipos.	Subjetividad del análisis si no tiene suficiente experiencia
Árbol de fallos	Sucesos complejos con muchos elementos distintos	Analista debe conocer bien el método. Requiere excelente conocimiento del sistema al cual se aplica y toda la documentación necesaria	Existen muchos programas para el tratamiento analítico del árbol de fallos.	Evidencia puntos débiles del sistema. Permite conocer a fondo el sistema.	Ofrece orientación sobre la frecuencia del suceso sobre la base del número de causas que lo puede producir.
Árbol de suceso	Descripción de la evolución de sucesos iniciadores	Poco laborioso	Existen programas para el tratamiento de árboles de sucesos muy complejos con dependencias funcionales.	Estudio sistemático de un suceso. Fácil de aplicar.	Tratamiento complejo si el árbol es grande.
Causa/consecuencia	Investigar conjuntamente las causas de un accidente y la evolución	Buen conocimiento del método y del sistema sobre el que se aplica	Es imprescindible	Condensa los resultados obtenidos mediante fallos y eventos.	Es de aplicación más compleja que las técnicas de análisis de fallos y eventos por separado.

3 METODOS PARA LA EVALUACIÓN CUALITATIVA DE ALCANCES DE CONSECUENCIAS ACCIDENTALES

La evolución cualitativa o mejor semicualitativa de los alcances de consecuencias de accidentes se basa normalmente sobre métodos simplificados de cálculo que contemplan la aceptación de criterios sencillos para la determinación de los tipo de accidentes posibles y sus alcances.

3.1 MÉTODO UCSIP

DESCRIPCIÓN

El método UCSIP, que ya se comentó en el apartado correspondiente a los índices de frecuencias, permite calcular también unos índices de gravedad.

De hecho, para definir los índices de frecuencias, también era necesario conocer estos índices de gravedad.

En este método UCSIP, del cual conviene remarcar de nuevo que se reseña más por motivos históricos que por su uso que ha sido poco extenso, la gravedad de un suceso viene determinada por dos elementos, las consecuencias de que de él se derivan y daño potencial que pueden causar.

Se utiliza una escala creciente de la gravedad, graduada en seis niveles:

0: Consecuencias nulas. Caracteriza los sucesos que ocurren normalmente durante el funcionamiento del sistema.

1: Consecuencias menores. No hay pérdida sensible en la capacidad de la instalación, ni interrupción de la operación, ni heridas a personas, ni daños notables a los bienes o a las instalaciones.

2: Consecuencias significativas. Hay pérdidas significativa de la capacidad de la instalación, pudiendo representar la detención de la operación normal. No hay heridas a las personas ni daños notables al sistema o a los bienes. Este nivel implica riesgos muy limitados en alcance e importancia.

3: Consecuencias críticas. Pueden haber heridas a las personas y/o daños notables al sistema o a los bienes. Este nivel comporta daños limitados a la unidad que incluyen el sistema accidentado.

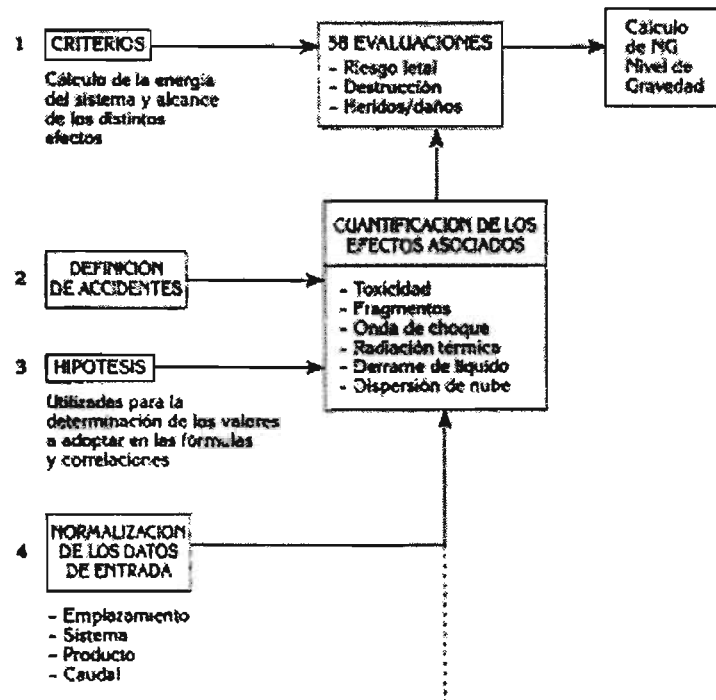
4: Consecuencias catastróficas con efectos limitados a la instalación industrial. Hay destrucción del sistema o de los sistemas vecinos, y/o varios heridos, y/o varios muertos.

5: Consecuencias críticas o catastróficas en las que los efectos sobrepasan los límites de la instalación industrial. Además de los descritos anteriormente, hay daños a las personas, a los bienes o a los sistemas exteriores a la instalación industrial.

La asignación del nivel de gravedad se basa sobre el empleo de un esquema lógico dividido en seis diagramas. El seguimiento del esquema proporciona, según las características del sistema al cual se aplica, las ecuaciones a utilizar para calcular las distintas consecuencias y los criterios para asignar NG según el efecto considerado. El valor de NG resultante es el máximo obtenido. Las ecuaciones o de correlaciones altas que recurre el método son simplificadas en sentido conservador o tendentes a sobreestimar las magnitudes.

En tes fase de asignación del nivel de gravedad se articula en torno a cuatro puntos clave que se reseñan en la figura 3.1

FIGURA 3.1 METODO UCSIP. DETERMINACION DEL NIVEL DE GRAVEDAD



1. CRITERIOS. La asignación del nivel de gravedad de un sistema depende básicamente de:

- La energía potencial del sistema
- el alcance de los efectos asociados a un accidente.

Desde el punto de vista de la energía de un sistema el método adopta como patrón de referencia al equivalente energético de un sistema disipado en ondas de sobrepresión positiva resultante de una explosión no confinada (UVCE) (*Unconfined Vapour Cloud Explosion*)

De ahí que no se consideran los sistemas con menos de 100 kg de hidrocarburos porque no existe, en la bibliografía especializada, casos históricos de accidentes graves registrados en estas condiciones. Sin embargo, se consideran dos excepciones:

- El producto presenta cierta toxicidad
- Para fragmentos, el nivel de energía letal adoptado es de 100 julios

Desde el punto de vista del alcance de los efectos asociados a un accidente, el método considera tres tipos de daños:

- Riesgo letal
- Posibilidad de rotura de componentes, equipos o sistemas como consecuencia del accidente calculado.
- Heridas y daños a los bienes.

Los umbrales que fija el método para cada uno de estos casos son los reseñados en el siguiente cuadro.

Consecuencia	Sobrepresión (bar)	Radiación térmica (kW/m ²)	Impacto J	Toxicidad
Riesgo letal	0,7	23,25	102	(CTL)(1)
Rotura de componentes equipos o sistemas	1,1	238	3,7.10 ⁻⁵	VLE(2)
Heridos o daños materiales	0,08	11,63		

(1) CTL: Concentración Tóxica Letal (mg m-3 mm).

(2) VLE: Valor Limite de Explosión (mg m-3).

2. DEFINICIÓN DE ACCIDENTES. La ocurrencia de fenómenos físicos no deseados (causa), conlleva efectos físicos (consecuencias) que pueden ocurrir solos o en combinación. El método considera como causas básicas de accidentes los cuatro siguientes casos:

1.- Rotura de un sistema que transfiera un líquido a presión (en fase líquida, gas o bifásico)
Engloba componentes como: bombas, compresores, válvulas, tuberías, etc.

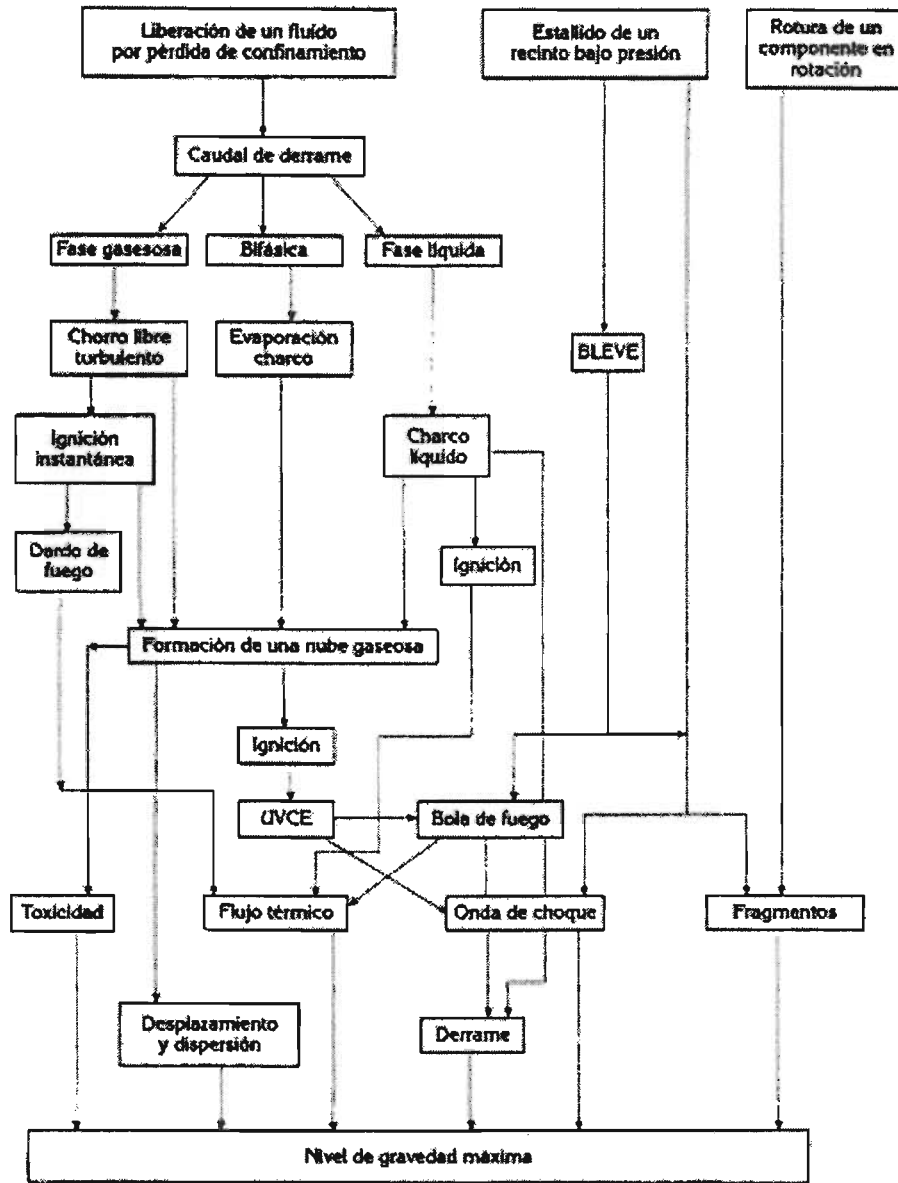
2.- Estallido de un equipo a presión (por sobrepresión o a la presión de servicio)
Engloba componentes como columnas de fraccionamiento, reactores, etc.

3.- Pérdida de confinamiento de un tanque / depósito.
Engloba los de techo fijo, flotante, esferas, cilindros de GLP, etc.

4.- Rotura de un equipo en rotación.
Incluye acoplamiento, compresores alternativos, etc.

Estos sucesos y consecuencias son los representados en la figura 3.2

FIGURA 3.2 METODO UCSIP. DEFINICION DE LOS ACCIDENTES



En caso de liberación de fluido por pérdida de confinamiento (caso 3) los pasos sucesivos en el cálculo de consecuencias que conducen al accidente final a considerar son:

- Cálculo del caudal de derrame.
- Según estado del fluido se consideran tres casos: fase gaseosa, bifásica o líquida.
 - a. En el caso de una fuga en fase gas se produce un chorro libre. Si el producto es inflamable se puede producir la ignición inmediata y el consiguiente dardo de fuego con la radiación térmica asociada que condicionará el nivel de gravedad.

Si no se produce una ignición inmediata se forma una nube de gas que según las características del producto liberado puede dar lugar a choque asociada que condicionarían el nivel de gravedad.

- b. En el caso de una fuga en fase bifásica el fenómeno a estudiar es la evaporación del charco y el estudio de la nube de gas generada sigue las mismas pautas que en el caso anterior.
- c. En el caso de fuga en fase líquida el charco líquido puede incendiarse si el producto es inflamable con el consiguiente efecto de flujo térmico. El tratamiento del gas evaporado sería el citado anteriormente.

En el caso de un estallido de un recipiente bajo presión (casos 1 y 2) el efecto BLEVE puede conducir a: formación de una bola de fuego, ondas de choque y producción de fragmentos que condicionarán el factor de gravedad.

En el caso de rotura de componente es rotación (caso 4) el efecto considerado es el de producción de fragmentos. Las consecuencias finales que trata el método son:

- a. Toxicidad,
- b. Generación de proyectiles,
- c. Sobrepresión por onda de choque,
- d. Radiación térmica,
- e. Derrame de líquido,
- f. Dispersión de una nube de gas.

3. **SELECCIÓN DE HIPÓTESIS.** Se pueden conducir de forma conservadora a la cuantificación de las consecuencias; a reducir el número de variables en las ecuaciones o correlaciones utilizadas; a establecer un procedimiento de cálculo fácilmente ejecutable con o sin medios informáticos.

Son las relativas al:

- Entorno del sistema estudiado.
- Desarrollo de los fenómenos físicos que conllevan determinados efectos físicos.
- A la cuantificación de los efectos físicos.

4. **NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA** relativos al emplazamiento, a los equipos, al producto y al caudal de fuga de partida.

El método considera 9 tipos de equipos (tanque, depósito, bombas centrífugas, etc) Para cada uno de ellos el método tiene tipificado un procedimiento de cálculo del caudal de fuga.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Este método encuentra su aplicación cuando no es necesaria una cuantificación detallada del alcance de la consecuencia del accidente. No permite, por lo tanto, dimensionar las zonas de intervención y alerta, aunque puede permitir fijar la categoría de los accidentes.

RECURSOS NECESARIOS

Es necesario disponer de la descripción completa del método y es preciso un cierto grado de experiencia en su aplicación

SOPORTES INFORMÁTICOS

UCSIP publica el método descrito en un soporte informatizado.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

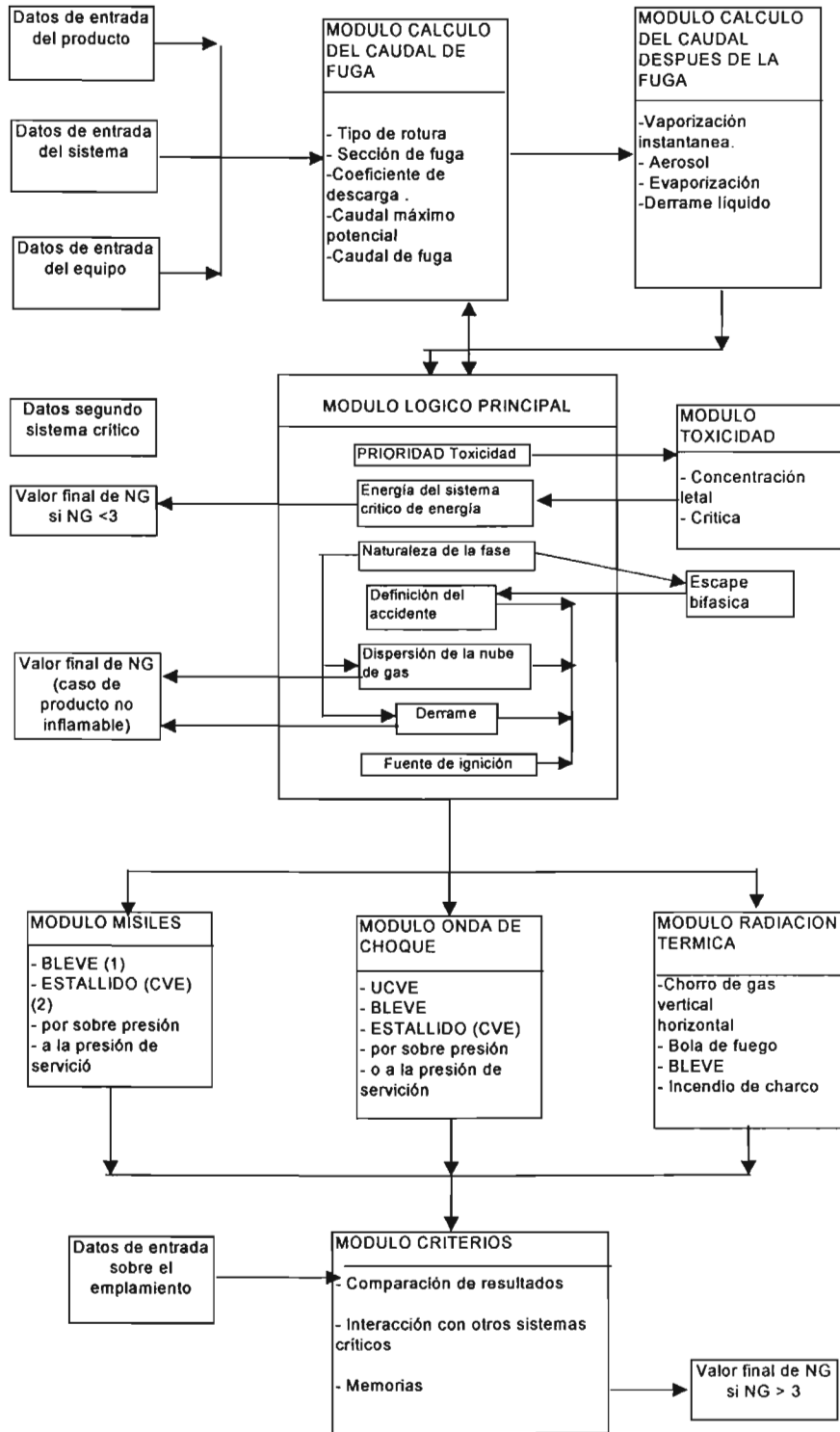
Precisa una menor dedicación de tiempo que la cuantificación mediante modelos de cálculo internacionalmente reconocidos, aunque la diferencia de dedicación difícilmente justifica las simplificaciones que se realizan en el proceso de cálculo.

Proporciona resultados excesivamente conservadores y no permite calcular unas distancias de afectación.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

En la figura 3.3 se muestra, el diagrama lógico correspondiente al procedimiento de cálculo del método.

FIGURA 3.3 METODO UCSIP. ESQUEMA LOGICO DE ASIGNACION DE NG



(1) Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion.
 (2) Confined Vapour Explosion.

Este diagrama presenta seis módulos de cálculo:

- Módulo de cálculo del caudal de fuga. Este módulo recibe la información relativa al producto, sistema o equipo. Con esta información determina según el tipo y sección de la rotura el caudal de fuga.
- Módulo de cálculo del caudal después de la fuga. Este módulo según las características del producto determina: el caudal de gas que se evapora de forma instantánea por diferencia entre la temperatura de almacenamiento / proceso del producto y su punto de ebullición (flash); el arrastre de líquido que puede producirse en la evaporación instantánea (aerosol); el caudal de evaporación del charco formado y la cantidad de líquido residual en el charco.
- Módulo principal. Este módulo define el equipo o sistema, da prioridad al cálculo de la toxicidad, calcula la energía del sistema, determina la dispersión de la nube e introduce los puntos de ignición. Por último, este módulo gobierna la ejecución de los restantes módulos.
- Los módulos de cálculo propiamente dichos son los correspondientes a toxicidad, escape bifásico, fragmentos, ondas de choque y flujo térmico. Calculan los correspondientes efectos.

Por último, el módulo criterios compara los resultados obtenidos con la implantación (distancias del equipo al límite de la instalación u otro equipo). Se asigna el valor de NG y se procesa a continuación el equipo o sistema más crítico con respecto del estudiado (efecto dominó).

3.2 OTROS MÉTODOS

DESCRIPCIÓN

Estos métodos recurren a una asignación directa de la severidad de las consecuencias por comparación con casos tipo ya resueltos, son métodos muy poco precisos y en el mejor de los casos sirven para fijar un orden de magnitud de los daños esperados.

Su aplicación conduce, por ejemplo, a una clasificación de las consecuencias de una fuga tóxica en las siguientes categorías:

- I. Baja (2): Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son muy bajas. Se puede esperar afectaciones sólo para exposiciones durante largos períodos de tiempo o cuando afecta a personas con condiciones de salud precarias.

(2) Extraída de *Guidance for the preparation of the Risk Management and Prevention*, program. Nov. 1989.

- II. Media: Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son suficientes para causar heridas o muertes a menos que se tornen medidas correctivas efectivas de forma rápida. Se pueden esperar víctimas mortales sólo para exposiciones durante largos períodos de tiempo o cuando afecta a personas con condiciones de salud precarias.
- III. Alta: Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son suficientes para causar muertes o heridos graves para exposiciones breves. Se puede esperar un gran número de personas afectadas.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

Se puede emplear en un estudio preliminar como método de selección del tipo de consecuencias a evaluar con mayor detalle.

RECURSOS NECESARIOS

La aplicación de estos métodos es sumamente subjetiva y precisa una gran experiencia en su realización.

SOPORTES INFORMÁTICOS

Normalmente no se utilizan soportes informáticos en la aplicación de esta técnica.

VENTAJAS / INCONVENIENTES

Puede ser un método de clasificación para instalaciones con gran número de equipos.

Para conseguir resultados coherentes, es necesaria gran experiencia al aplicar criterios de clasificación

3.3 RESUMEN

En la tabla 3.1 se resumen las características de los métodos en este capítulo

..... TABLA 3.1 METODOS PARA LA EVALUACION CUALITATIVA DEL ALCANCE DE CONSECUENCIAS

Método	Ambito de aplicación	Recursos humanos / materiales	Soporte informáticos	Ventajas	Inconvenientes
UCSIP	En los casos en que no se requiera una cuantificación del alcance de consecuencias	Buen conocimiento del método	Se publica en soporte informático	Precisa una menor dedicación que el uso de modelos matemáticos aunque difícilmente se justifique con diferencia de tiempo su uso	Resultados conservadores. No se dan distancias de afectación
Clasificación cualitativa	Estudio preliminar	Gran experiencia en su uso	-----	Util para instalaciones con muchos equipos.	Subjetividad del analista si no tiene suficiente experiencia.

CONCLUSIÓN

Los objetivos últimos de los análisis de riesgos son la prevención de la ocurrencia y mitigación de los efectos de accidentes en instalaciones industriales potencialmente peligrosas a través de un estudio sistemático de las mismas.

Básicamente consisten en:

- Identificar los riesgos que puede representar una instalación industrial para las personas, bienes y medio ambiente.
- Tipificarlos en una serie de accidentes mayores cuya ocurrencia es factible.
- Detener los alcances que pueden tener estos accidentes.
- Definir las zonas vulnerables.
- Calcular los daños que pueden provocar.
- Analizar las causas de los accidentes, eventualmente cuantificando sus frecuencias.
- Determinar las medidas de prevención y protección, incluyendo las de carácter organizativo, para evitar su ocurrencia o mitigar las consecuencias.
- Determinar el nivel de riesgo asociado a las instalaciones.

Más ampliamente los análisis de riesgo deberían ser un medio para evaluar también la política general de la seguridad de la empresa, junto con otros documentos, Plan de Emergencia Interior, abarcando:

- Organización y gestión de la empresa.
- Diseño y legislación aplicables
- Mantenimiento e inspecciones periódicas.
- Permisos de trabajo y procedimientos operativos.
- Registro de accidentes.
- Formación e información a los operarios.

TIPOS DE INSTALACIÓN

Para poder recomendar la metodología más idónea para el análisis de riesgo de una instalación es necesario fijar una serie de criterios.

- La legislación vigente en materia de riesgo de accidentes que se fundamenta en una clasificación de las instalaciones basadas principalmente en las cantidades y características de las sustancias peligrosas. Esta clasificación condiciona de forma objetiva y directamente la metodología a aplicar para el análisis marcando las exigencias mínimas legales.
- Otras características de las instalaciones (extensión, tipo de instalación, proceso, entorno, etc.) pueden condicionar también la metodología y métodos a seguir en cada caso.

a) Extensión de la instalación.

El tamaño de una instalación determina la complejidad del estudio (una Refinería, por el gran número de unidades que la componen, requiere un análisis amplio). Asimismo, en cuando a número de empleados, proporciona también una estimación de los recursos humanos y materiales disponibles para los estudios.

b) Tipo de instalación.

Básicamente pueden distinguirse entre cuatro tipos de instalación:

- Instalaciones de almacenamiento de productos químicos. Las operaciones que les son asociadas son principalmente operaciones de carga/descarga desde los distintos elementos (camiones cisternas, vagones cisternas o barcos), de trasiego y envasado.
- Instalaciones de producción, transformación o tratamiento de sustancias químicas.
- Instalaciones en las cuales existen a la vez áreas de almacenamiento (materia primas, productos intermedios o productos acabados) y de proceso.
- En algunos casos, instalaciones de tratamiento de residuos industriales.

En las primeras el riesgo asociado proviene más, en general, de los inventarios de producto que de la complejidad de las instalaciones. En el segundo caso el riesgo puede ser más disperso y el estudio es normalmente más laborioso por los distintos tipos de productos que intervienen, las condiciones variables de operación, las mayores interrelaciones entre distintos sistemas etc.

c) Tipo de proceso.

Conviene también distinguir entre procesos continuos y procesos discontinuos o "batch". Estos últimos son secuenciales lo que obliga a un planeamiento de análisis de análisis de las distintas fases de la operación, tanto en la identificación de los riesgos, como en su posterior tratamiento. Intervienen factores como el orden de los pasos seguidos, errores en la naturaleza, cantidad y calidad de las materias primas, etc. Porque a menudo se suelen compartir las líneas de proceso para la fabricación de productos distintos. Por otra parte suelen ser procesos mecanizados y con mayor contribución manual.

En los primeros existen unas variables de proceso estacionarias que suelen oscilar mínimamente entre unos valores determinados.

d) Entorno de la instalación.

El entorno, a su vez, juega un papel decisivo a la hora de seleccionar la metodología a seguir. La presencia de puntos vulnerable (poblaciones, lugares de concentración ocasionales de personas, edificios singulares o zonas protegidas, etc.), justifican estudios más precisos no sólo en cuanto a alcances de posibles daños, sino también en cuanto a riesgo. Por otro lado, la proximidad de plantas y otros lugares potencialmente peligrosos en la vecindad de la instalación requerirán un tratamiento específico en el análisis de riesgos.

SITUACIONES OPERATIVAS DE LA INSTALACIÓN

Las situaciones operativas distintivas de una instalación constituyen también un factor a tomar en consideración. Un análisis de riesgos completo debería contemplarse cada una de las posibles situaciones operativas posibles en la medida en que cada una de ellas contribuye al riesgo total de la instalación. En cada una de ellas, por otra parte, los riesgos pueden ser distintos e inherentes a la propia situación. Su tratamiento, asimismo, será diferente.

Así, para instalaciones de proceso, se podría distinguir:

- Las puestas en marcha.
- Los arranques.
- Las paradas programadas.
- Las paradas de emergencia.
- Desmantelamiento y residuos en casos singulares.

Todas ellas son habitualmente secuenciales con sus particularidades propias y requerirán un enfoque que atienda a cada una de las fases que las compongan.

La situación operativa de funcionamiento normal dependerá tal como ya se ha indicado anteriormente del tipo de proceso.

Por último, las operaciones de mantenimiento son operaciones que en determinados casos pueden realizarse durante el proceso productivo o condicionar el estado de determinados componentes de un sistema (indisponibilidad de válvulas no restauradas a su posición normal tras una operación de mantenimiento o pruebas).

Para instalaciones de almacenamiento, tanto fijas como temporales (estaciones de clasificación, instalaciones portuarias) deberá distinguirse entre:

- Las operaciones de trasiego: continuos (por ejemplo, de suministro de materias primas a la parte de proceso) o las intermitentes (carga/descarga desde/a algún medio de transporte a instalación fija).
- Sin actividad pero con los recipientes parcial o totalmente llenos.
- Operaciones de mantenimientos, planificadas o no, de depósitos (vaciado, inertizado, aireado, etc.)

Tipos de riesgos a considerar

Aunque los análisis de riesgo se centran principalmente en los accidentes que finalmente involucren productos químicos, también deberían de contemplar todos aquellos otros accidentes que pueden causar daño.

Básicamente el análisis de riesgos deberían reflejar los siguientes riesgos químicos:

- Riesgos químicos provocados por causas internas. Entre estos destacan:
 - Fallo de servicios (suministro eléctrico, agua de enfriamiento, corte de vapor de calefacción, etc)
 - Fallo de operación (sobrellenado, vaciado, sobrepresurizado, entrada en vacío, etc)
 - Pérdida de contención (fugas, colapsos, roturas, etc)
- Riesgos químicos provocados por causas externas:
 - Causas naturales: inundaciones, sismos, lluvias torrenciales, incendios forestales, vendavales, etc.
 - Tecnológicos: actos de sabotaje, accidentes en instalaciones vecinas, etc.

- Efectos sinérgicos y dominó

El efecto sinérgico es el que puede ocurrir cuando se producen simultáneamente dos sucesos generando consecuencias que no son comparables a la suma de los efectos contemplados de forma individual.

MÉTODOS EXISTENTES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Básicamente pueden considerarse dos tipos de métodos, **Cualitativos y Cuantitativos**:

Métodos Cualitativos

- Análisis histórico
- HAZOP
- Análisis de modo, efecto y criticidad de los fallos
- Análisis preliminar de riesgos
- Check list
- What if...?
- Clasificación mediante índice de Mond de fuego, explosión y toxicidad.
- Clasificación mediante el índice de Dow de fuego, explosión y toxicidad.
- Auditorias de seguridad

Métodos cuantitativos

- Obtención directa de frecuencias
- Árbol de sucesos
- Árbol de fallos
- Determinación del riesgo

CRITERIOS DE SELECCIÓN

Básicamente se distinguen:

- **Criterios aplicables a toda la instalación:**

Tamaño de la instalación
No. De personal.

- **Criterios aplicables a cada unidad**

Cantidades almacenadas
Tipo de proceso
Condiciones de almacenamiento/operación.
Control
Edad de la unidad.
Ampliación o modificación.
Vulnerabilidad del entorno.
Fase operativa.
Diseño

Para el caso de los métodos cualitativos, el HAZOP se considera un método muy completo, muy ampliamente utilizado sobre todo para plantas de proceso. Permite identificar iniciadores asociados a las desviaciones de operación, proceso y sucesos externos.

Por tanto, se considera preferente su uso para plantas de proceso, de riesgo intrínseco elevado u/o diseños nuevos.

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

Para instalaciones con un elevado número de áreas, como refinerías por ejemplo, se recomienda realizar en primer término un análisis tipo Dow o Mond para identificar las áreas de mayor riesgo de la instalación. A estas se les deberá aplicar posteriormente métodos más precisos para un estudio más profundo ya que el método citado solo da una estimación orientativa de riesgo.

En el caso de los métodos cuantitativos, la técnica del árbol de fallos es relativamente laboriosa y se aplicará en aquellos casos en que esto se justifique:

- Ausencia de dato directo en fuentes consultadas.
- Por la complejidad del suceso estudiado.
- Alto grado de interrelación entre sistemas, operador, etc.

La técnica del árbol de sucesos se utilizará normalmente para calcular la frecuencia de un accidente cuando se conoce la frecuencia del suceso iniciador correspondiente en función de las probabilidades de los distintos eventos que condicionan la evolución del suceso iniciador.

TABLA RESUMEN DE LOS METODOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO

ANÁLISIS	METODO	CRITERIOS DE SELECCIÓN
QUALITATIVO	Análisis histórico HAZOP FMEA / FMEAC Análisis preliminar Check list What If...? Semicuantitativos Índice Dow Índice Mond Otros Auditorias de seguridad	Los métodos citados son prácticamente aplicables en todos los casos según las características de la instalación.
CUANTITATIVO	Directa (datos bibliográficos) Árbol de fallos Árbol de sucesos Riesgo global Riesgo individual Riesgo social	Suceso sencillo de causa bien definida Suceso complejo involucrando diversos factores. Para determinar la frecuencia de un accidente según los factores que condicionan su evolución Se aconseja calcular los tres tipos
OTROS	UCSIP Clasificación mediante índices de frecuencia y severidad de consecuencias Clasificación con Índice DOW /MOND	Diseñado para refinerías. Aplicable a cualquier tipo de instalación. Aplicable a instalaciones de más de tres unidades.

BIBLIOGRAFÍA

Páginas web

www.proteccioncivil.org (Dirección General de Protección Civil Española)

www.profepa.gob.mx (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente)

www.semarnat.gob.mx (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)

Dirección General de Protección Civil Española, *Guía Técnica: Métodos cualitativos para el análisis de riesgos*, España, 2004.

Dirección General de Protección Civil Española, *Guía Técnica: Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos*, España, 2004.

J.M. Santamaría & P.A. Braña Aísa, *Risk analysis and reduction in chemical process industry*, Gran Bretaña, ed. Blackie Academic and Professional; 1998.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Guía para la presentación del estudio de riesgo ambiental nivel 0 Ductos Terrestres*, México, 2002.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Guía para la presentación del estudio de riesgo ambiental nivel 1 Informe Preliminar de Riesgo*, México, 2002.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Guía para la presentación del estudio de riesgo ambiental nivel 2 Análisis de Riesgo*, México, 2002.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Guía para la presentación del estudio de riesgo ambiental nivel 3 Análisis Detallado de Riesgo*, México, 2002.

R. Greenberg Harris & J. Cramer Joseph, *Risk assessment and risk management for the chemical process industry*. USA, ed. Van Nostrand Reinhold, 1991.

T. Convello Vincent & W. Merkhofer Miley, *Risk assessment methods*, USA, ed. Plenum Press, 1993.