1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA SINIESTRALIDAD INDUSTRIAL EN ESPAÑA

Después de los accidentes de Flixborough (1974), Seveso (1976), Bhopal (1984) y algunos otros, la preocupación por la seguridad en las instalaciones industriales ha experimentado un crecimiento espectacular, especialmente en las sociedades avanzadas. El desarrollo de marcos legislativos específicos sobre seguridad (Directivas Seveso, Ley de Prevención de Riesgos Laborales [BOE 1995], Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico [BOE 1991] [PEREZ 1992], y un sinfín de normas técnicas y reglamentos [CORTES 1996] [LARREA 1994]), la puesta en marcha de mecanismos administrativos de control y el incremento de publicaciones y estudios sobre el tema, son una evidencia de la mayor relevancia social que han adquirido en la última década los aspectos de seguridad industrial.

Ha contribuido también a ello de forma importante el desarrollo en paralelo de los sistemas de gestión de la calidad y de las políticas medioambientales en la empresa. Hoy en día, la gestión integral Calidad-Medio Ambiente-Seguridad es ya una realidad en muchas empresas y la tendencia es que se incremente su implantación en los próximos años [MEWIS 1995].

La competitividad comercial en los mercados libres y las crisis energéticas del último cuarto del siglo XX han agudizado la necesidad de incrementar la calidad del producto y la eficiencia de los procesos productivos. Las modernas tecnologías de control y automatización, así como nuevos planteamientos de gestión y optimización de recursos, han permitido estas mejoras. Los niveles de seguridad no han quedado ajenos a esta evolución y las medidas preventivas presentes en las instalaciones modernas no pueden compararse con las que existían en el pasado [RENSHAW 1990].

Sin embargo, año tras año se incrementa significativamente la fabricación, comercio y consumo de productos de alto valor añadido que requieren procesos industriales cuya complejidad y sofisticación va en aumento [ALONSO 1993]. Y ello conlleva la utilización de sustancias a menudo reactivas y peligrosas, y procesos con márgenes de seguridad más estrechos y algunas veces en condiciones extremas de operación.

Simplemente a título de ejemplo, y sin pretender desarrollar un estudio comparativo o exhaustivo sobre el tema, se presentan en este apartado una serie de datos de diversas fuentes que justifican por sí mismos la importancia socioeconómica de los accidentes industriales acaecidos en España en los últimos años. Sin olvidar el aspecto humano del problema, se centra esta revisión en las cuestiones económicas del mismo, por ser perfectamente objetivables.

En el informe “Estadística de Accidentes de Trabajo 1998” sobre siniestralidad laboral, elaborado por el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales [MTAS 1999], se recopilan 753.396 accidentes con baja producidos durante la jornada de trabajo a lo largo de todo el año 1998, 1.075 de los cuales tuvieron consecuencias mortales (Véase Tabla 1.1). Puede compararse esta información con otras referencias bibliográficas de la misma fuente [MTAS 1998] [MTAS 1999-2] [MTAS 1999-3] o con [DTREBALL 1999].

En concreto, y según la misma fuente, en la industria química española, en 1998 se produjeron 36.757 accidentes con baja, según se detalla en la Tabla 1.2. Se agrupan en el concepto industria química los siguientes epígrafes: coquerías, refinerías, tratamiento de combustibles, industria química, fabricación de materias plásticas y fabricación de productos minerales no metálicos.

De estos 36.757 accidentes, 9.113 (24,8%) fueron debidos a agentes químicos y/o explosivos según la distribución que se presenta en la Tabla 1.3.

Tabla 1.1. Accidentes con baja producidos durante la jornada laboral en España en 1998.

ACCIDENTES CON BAJA	Nº ACCIDENTES	%	Nº JORNADAS NO TRABAJADAS	%	DURACION MEDIA DE LAS BAJAS (Jornadas)
LEVES	741.455	98,4	15.900.554	95,4	21,4
GRAVES	10.866	1,4	770.298	4,6	71,0
MORTALES	1.075	0,2	--	--	--
TOTAL	**753.396**	**100,0**	**16.670.852**	**100,0**	**Media: 22,1**

Tabla 1.2. Accidentes con baja producidos durante la jornada laboral en industrias del sector químico en España en 1998.

ACCIDENTES CON BAJA	Nº ACCIDENTES	%	Nº JORNADAS NO TRABAJADAS	%	DURACION MEDIA DE LAS BAJAS (Jornadas)
LEVES	36.259	98,6	729.080	95,2	20,1
GRAVES	457	1,2	36.655	4,8	80,2
MORTALES	41	0,1	--	--	--
TOTAL	**36.757**	**99,9**	**765.735**	**100,0**	**Media: 20,8**

Tabla 1.3. Distribución de los agentes químicos y explosivos causantes de los accidentes en la industria química española en 1998.

AGENTE CAUSANTE	Nº DE ACCIDENTES	%
Agentes químicos sin especificar	4.043	44,4
Cáusticos y corrosivos	3.478	38,2
Tóxicos y venenosos	465	5,1
Asfixiantes e irritantes	428	4,7
Productos inflamables (no explosivos)	350	3,8
Anestésicos y alergénicos	191	2,1
Explosivos sólidos	66	0,7
Explosivos líquidos y gaseosos	61	0,7
Atmósferas deflagrantes	31	0,3
TOTAL	**9.113**	**100,0**

NOTA: La misma clasificación relativa a otros años está disponible en [COASHIQ 1996] y [COASHIQ 1997].

Suponiendo un coste empresarial medio por hora trabajada de 1.900 pesetas [COASHIQ 1998], un simple cálculo, carente de rigor técnico pero altamente intuitivo, indica que la pérdida de 765.735 jornadas de trabajo supone un coste superior a los once mil millones de pesetas anuales. Y todo ello sin haber tenido en cuenta los daños materiales colaterales.

Frank E. Bird, trabajando para la Insurance Company of North America (INA), publicó en 1966 un estudio sobre 1.700.000 accidentes según el cual por cada accidente grave o mortal se producen 10 accidentes con baja, 30 con daños materiales y 600 incidentes, en los que no se produce ni lesión ni daño material [APA 1984], [JONES 1999]. Sorprendentemente, esta relación (1-10-600) se mantiene en la estadística de siniestralidad laboral española para accidentes con baja clasificados según su gravedad (1-10-689). Independientemente de que se cumpla o no la relación indicada, lo cierto es que es evidente que a las jornadas perdidas por baja del personal hay que

añadir las horas de trabajo perdidas por incidentes que no llegan a causar baja y que no quedan recogidas en las estadísticas oficiales.

Según el estudio “Estadísticas de accidentes 1997” [COASHIQ 1997] presentado anualmente por COASHIQ (Comisión Autónoma de Seguridad e Higiene en el trabajo de industrias Químicas y Afines), adherida a FEIQUE, la distribución de estos accidentes en función de la forma de ocurrencia es la siguiente:

Tabla 1.4. Distribución según el tipo de accidente en la industria química española en 1997.

TIPO DE ACCIDENTE	%
Colisiones con objetos	30,19
Caídas de personas u objetos	19,68
Sobreesfuerzos	14,45
Otros	7,37
Atrapamientos en o entre objetos	7,19
Proyección de partículas	6,05
Temperaturas ambientales extremas y contactos térmicos	5,98
Contactos con sustancias cáusticas o corrosivas	5,98
Exposición a sustancias nocivas	2,18
Incendios	0,48
Exposición a contactos eléctricos	0,21
Explosiones	0,17
Exposición a radiaciones	0,07

Todo lo expuesto hasta el momento pone de relevancia la enorme importancia de la seguridad en la industria química y la importante repercusión social y económica que tienen los accidentes industriales.

Por lo que a pérdidas económicas por daños materiales se refiere, se presentan a continuación algunos resultados obtenidos del estudio de la entidad Investigación Cooperativa entre Entidades Aseguradoras (ICEA) [ICEA 1996] [ICEA 1997] [ICEA 1998], [ICEA 1998-2] que engloba un total de 6.241 (5.622 en 1997) instalaciones industriales aseguradas por más de 500 millones de pesetas con un volumen total de primas (cantidad anual que se paga por asegurar un bien) para incendios de 10.347 (13.606 en 1997) millones de pesetas. Se estima que la muestra representa el 60% del mercado tanto en número de instalaciones como en volumen de primas, lo que implicaría que el total de instalaciones industriales de más de 500 millones de pesetas en España es de 10.401 y el total de primas ascendería a 17.245 (22.300 en 1997) millones de pesetas.

La Tabla 1.5 indica la distribución de riesgos y tasas por sectores de actividad (según la tarifa de incendios de UNESPA [UNESPA 1977]). Hay que señalar que en el lenguaje asegurador se entiende por riesgo cada una de las instalaciones o bienes asegurados.

Destaca en esta tabla el reducido número de riesgos de tipo químico asegurados por más de 500 millones de pesetas (324), así como los capitales asegurados relativamente bajos (el capital medio es de 4.898 millones de pesetas, que para instalaciones de tipo químico es relativamente bajo). Ello se justifica porque la gran empresa química se agrupa en grandes multinacionales que suelen buscar su cobertura aseguradora en entidades extranjeras que quedan fuera del ámbito de ICEA.

Tabla 1.5. Distribución de riesgos por sectores de actividad en 1998.

RIESGOS	NÚMERO DE INSTALA-CIONES	CAPITALES TOTALES ASEGURADOS (millones ptas)	%	PRIMAS ANUALES DE INCENDIO (millones ptas)	%	TASA ANUALDE INCENDIOS[1] (‰)
Minería	119	1.725.361	9,33	700,997	6,77	0,78
Piedra y tierra	174	621.141	3,36	370,824	3,58	0,61
Metales	1.135	2.936.501	15,88	1.631,963	15,77	0,58
Químicas	324	1.587.211	8,58	1.180,414	11,41	0,78
Textiles	266	433.513	2,34	482,142	4,66	1,26
Papel, cuero y caucho	287	541.098	2,93	551,929	5,33	1,06
Madera	160	202.873	1,10	342,701	3,31	1,85
Alimentación y tabaco	799	1.325.677	7,17	818,642	7,91	0,70
Energía y calor	100	615.671	3,33	329,341	3,18	0,54
Diversos	2.877	8.506.598	45,99	3.937,864	38,08	0,50
TOTAL	**6.241**	**18.495.644**	**100,00**	**10.346,817**	**100,00**	**0,63**

Nota: Los capitales asegurados incluyen los correspondientes a mercancías flotantes, mientras que la tasa anual se ha calculado sobre el capital fijo exclusivamente.

A pesar de lo indicado, resulta significativo que la tasa anual de incendios aplicada a los riesgos de tipo químico haya disminuido significativamente en los últimos años, pasando de un 1,99 por mil en 1996 al 0,78 de 1998. Ello indica que para el conjunto de las entidades aseguradoras españolas, la industria química ha mejorado sensiblemente los niveles de seguridad e implica un menor riesgo. No obstante, hay que considerar que con toda probabilidad esa tasa está afectada a la baja por consideraciones comerciales.

La evolución anual de la tasa media general (Figura 1.1) muestra una clara tendencia decreciente en los últimos años, que puede venir justificada por una mejora generalizada en la "calidad" del riesgo (su seguridad intrínseca) aunque afectada de forma muy importante por la tendencia actual a la reducción de márgenes de beneficios en las empresas aseguradoras, obligadas por la competitividad sectorial. Sin embargo es evidente que esa reducción no se hubiera producido si el comportamiento siniestral de la cartera no hubiera sido positivo o cuanto menos estable (en los años 1995, 1996 y 1997 la tasa de siniestralidad[2] estuvo entre el 61,21% y el 61,25% y en términos generales se entiende que una tasa siniestral menor del 65% supone márgenes técnicos positivos).

Puede apreciarse en la Tabla 1.5 que el sector químico representa el 8,58% de los capitales asegurados y el 11,41% de las primas, lo que ya de por sí muestra la mayor peligrosidad de este sector respecto a otros.

Puede hacerse un análisis similar al anterior, desglosando el sector "Químicas" en sus diversas familias, según la tarifa de incendios de UNESPA antes referida (Tabla 1.6).

La Tabla 1.6 pone de manifiesto que las actividades de fabricación de materias plásticas espumosas, de explosivos y de fertilizantes son las de mayor riesgo dentro del sector, seguidas de lejos por la fabricación de materias plásticas no espumosas y las refinerías de petróleo y plantas petroquímicas. Es de destacar no obstante, abundando en lo indicado en párrafos anteriores, que en este estudio hay categorías

[1] Tasa anual de incendios: (en tanto por mil) coste económico de la cobertura aseguradora por capital asegurado.

[2] Tasa de siniestralidad: valor obtenido al dividir el importe total pagado por siniestros por el total de primas, expresado en tanto por ciento.

en las que se incluyen muy pocos individuos como para que las mismas tengan relevancia desde un punto de vista estadístico.

Figura 1.1. Evolución de la tasa anual de incendios media en riesgos industriales desde 1985 a 1998.

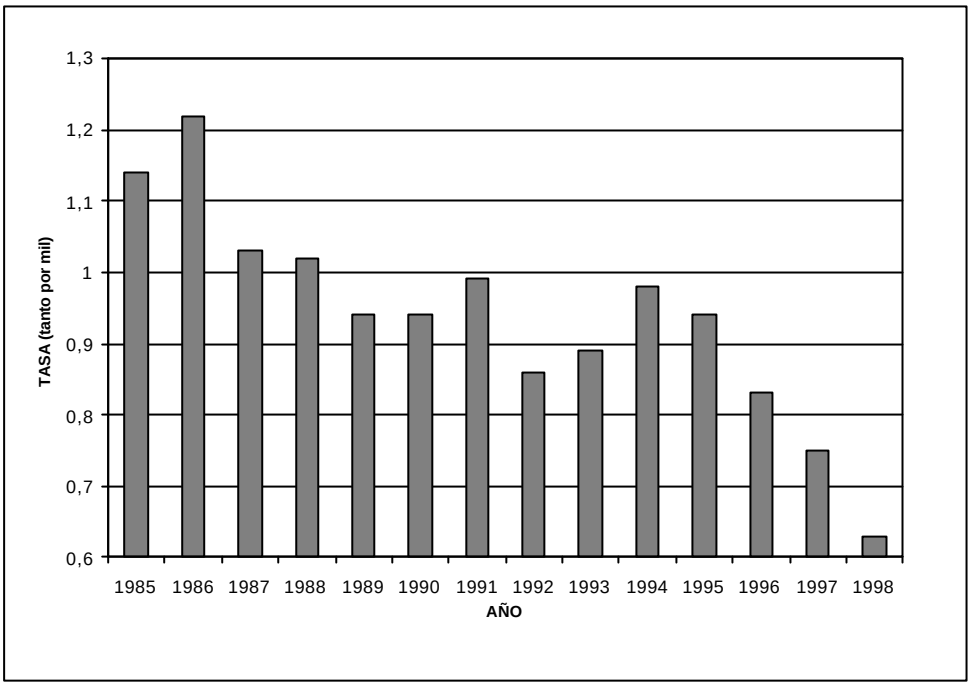

Tabla 1.6. Distribución de riesgos por tipo de actividad dentro del sector químico en 1998.

RIESGOS	Nº DE INSTALA-CIONES	CAPITALES TOTALES ASEGURADOS (millones ptas)	PRIMAS ANUALES DE INCENDIO (millones ptas)	TASA ANUAL DE INCENDIOS (‰)
Fábrica de productos químicos, farmacéuticos, pintura y barnices.	101	264.108	234,88	0,98
Refinería de petróleo y plantas petroquímicas.	15	914.563	290,49	0,32
Fábrica de objetos de materias plásticas no espumosas.	145	250.412	382,49	1,68
Fábrica y manipulación de materias plásticas espumosas.	17	25.593	78,874	3,23
Fábrica de fibras artificiales, semi o enteramente sintéticas.	4	18.215	15,601	0,9
Fabricación de películas y papeles fotográficos.	0	0	0	
Fabricación de productos de engrase, aceites y grasas industriales.	2	1.379	1,63	1,21
Fábricas de jabones, detergentes y productos de limpieza, perfumes, cosméticos y cera.	17	20.990	23,958	1,17
Fábricas de abonos.	2	3.856	8,208	2,13
Fábricas de pólvora, explosivos, fósforos y pirotécnica.	3	56.441	119,98	2,39
Otras industrias químicas.	18	31.652	24,3	1,04
TOTAL	**324**	**1.587.209**	**1.180,4**	**0,78**

Por lo que se refiere a la siniestralidad por sectores, el estudio contempla 6.241 riesgos industriales, según se recoge en la Tabla 1.7 (los importes económicos se indican en millones de pesetas de 1998 y las tasas y frecuencias en valores porcentuales).

Aunque de nuevo hay que matizar los resultados, dado lo reducido de la muestra estadística, es importante hacer notar que el 21,60% de las empresas químicas sufrieron siniestros con un importe total de 171 millones de pesetas. Pese a que la frecuencia siniestral es de las más elevadas, de hecho, el importe medio por siniestro (2,4 millones de pesetas) es de los más reducidos. Es de destacar no obstante, que estos datos variarían de forma sensible si hubiera habido uno o más siniestros importantes, tal como ha sucedido en anualidades anteriores [ICEA 1997].

La citada frecuencia siniestral del 21,60% se sitúa en la banda alta de entre todos los sectores, lo que junto a lo anteriormente comentado, pone de manifiesto que en las plantas químicas se originan más siniestros, pero que cuando estos ocurren, su gravedad es inferior a la de otros sectores. En general, este tipo de empresa tiene implantados unos sistemas productivos y de seguridad y control más estrictos y eficaces que el resto, lo que puede justificar el reducido impacto de los siniestros.

Tabla 1.7. Distribución de siniestros por sectores de actividad en 1998.

RIESGOS	Nº DE RIESGOS	Nº DE SINIESTROS	FREC.[3]	PRIMAS TOTALES	IMPORTE SINIESTROS (millones de pesetas)	IMPORTE MEDIO (millones de pesetas)	TASA SINIES-TRAL
Minería	119	22	18,49	704,743	132,769	6,035	18,84
Piedra y tierra	174	19	10,92	375,423	107,466	5,656	28,63
Metales	1135	122	10,75	1.706,56	342,36	2,806	20,06
Químicas	324	70	21,60	1.238,26	171,12	2,445	13,82
Textiles	266	41	15,41	524,866	360,861	8,801	68,75
Papel, cuero y caucho	287	42	14,63	565,837	332,743	7,922	58,81
Madera	160	25	15,63	363,511	2.600,305	104,012	715,33
Alimentación y tabaco	799	171	21,40	903,486	1133,73	6,630	125,48
Energía y calor	100	23	23,00	329,457	333,8	14,513	101,32
Diversos	2.877	366	12,72	4.242,10	810,979	2,216	19,12
TOTAL	6.241	901	14,44	10.954,24	6.326,13	7,021	57,75

Para terminar con esta visión global de la accidentabilidad en el sector industrial español, con especial énfasis en la industria química, se presentan en la Tabla 1.8 los mismos datos desglosados para cada una de las áreas de actividad dentro del sector químico. Como en la tabla anterior, los importes económicos se indican en millones de pesetas de 1998 y las tasas y frecuencias en valores porcentuales.

Cabe destacar de estos datos, la elevada frecuencia siniestral del sector relacionado con la fabricación de pinturas, barnices y materias plásticas espumosas.

Resulta sorprendente, no obstante, el reducido importe medio de los siniestros. De hecho, la tasa de siniestralidad del 13,82% pone de manifiesto que el año 1998 fue un

[3] Frecuencia: valor obtenido al dividir el número de siniestros por el número de riesgos, expresado en tanto por ciento.

año extraordinariamente favorable para el sector asegurador español en el ámbito de las industrias químicas.

Tabla 1.8. Distribución de siniestros por tipo de actividad en el sector químico en 1998.

RIESGOS	Nº DE RIESGOS	Nº DE SINIESTROS	FREC.	PRIMAS TOTALES	IMPORTE SINIESTROS (millones de pesetas)	IMPORTE MEDIO (millones pesetas)	TASA SINIESTRAL
Productos químicos, farmacéuticos, pintura y barnices.	101	29	28,71	248,958	99,177	3,420	39,84
Refinerías y plantas petroquímicas.	15	1	6,67	293,708	18,175	18,175	6,19
Objetos de materias plásticas no espumosas.	145	31	21,38	405,695	37,270	1,202	9,18
Materias plásticas espumosas.	17	2	11,76	81,216	0,120	0,060	0,15
Fibras artificiales, semi o enteramente sintéticas.	4	0	0,00	16,088	0,000		0,00
Fabricación de películas y papeles fotográficos.	0	0		0,000	0,000		
Fabricación de productos de engrase, aceites y grasas industriales.	2	2	100,00	1,650	0,650	0,325	39,39
Fábrica de jabones, detergentes y productos de limpieza, perfumes, cosméticos y cera.	17	2	11,76	24,363	0,280	0,140	1,15
Fábricas de abonos.	2	0	0,00	8,208	0,000		0,00
Fábricas de pólvora, explosivos, fósforos y pirotécnica.	3	1	33,33	128,843	11,000	11,000	8,54
Otras industrias químicas.	18	2	11,11	29,531	4,450	2,225	15,07
TOTAL	324	70	21,60	1.238,26	171,122	2,445	13,82

A modo de resumen de todo lo expuesto en este primer apartado, se recogen en la Tabla 1.9, algunos de los datos más significativos en relación con la realidad siniestral en España. Merece la pena aclarar que cuando se hace referencia a “Nº de siniestros de incendio”, se engloban en este epígrafe los incendios propiamente dichos, las explosiones y las caídas de rayo, pues así está estructurada la tarifa sectorial.

Conviene hacer notar que en todo momento se ha hecho referencia a las tipologías de siniestro amparadas por pólizas de seguro “convencionales”. Existen numerosas situaciones accidentales que por no tener cobertura aseguradora, no han sido reflejadas en este estudio (derrames, contaminación de suelos, emisiones fortuitas a la

atmósfera, etc.). Tampoco han quedado reflejados aquí accidentes en el transporte de mercancías ni accidentes “in itínere”.

Asimismo, los daños económicos relacionados con los siniestros que provocan daños materiales no contemplan las pérdidas de beneficios o por la paralización de las industrias afectadas, partida que a menudo puede ser tanto o más importante que los propios daños materiales directos.

Tabla 1.9. Resumen de algunos valores significativos sobre siniestralidad industrial en España

PARÁMETRO	GLOBAL	SECTOR QUÍMICO
Nº de accidentes laborales	753.396	36.757
Nº de jornadas pérdidas	16.670.852	765.735
Nº de siniestros de incendio en empresas de más de 500 millones de pesetas de capital asegurado	901	70
Frecuencia siniestral en tanto por ciento	14,44	21,60
Importe total de los siniestros (millones de pesetas)	6.326	171,12
Tasa siniestral en tanto por ciento	57,75	13,82

Todo ello permite poner en evidencia el enorme coste económico, sin olvidar el coste social, que representan los accidentes en la industria española, ya sean de tipo laboral, con daños a las personas, ya sean únicamente con daños materiales y costes indirectos. Es evidente que el coste de los accidentes industriales es muy importante y justifica enormes inversiones en investigación y desarrollo en las áreas de prevención y protección.

El sector químico en particular destaca por una frecuencia siniestral superior a la media, pero con un coste por accidente muy reducido en 1998. Como se ha comentado anteriormente, esta circunstancia es absolutamente extraordinaria respecto a años anteriores.

1.2. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE RIESGOS

1.2.1. Definición matemática de riesgo

Se define el riesgo [MIR 1997] como la esperanza matemática de la pérdida. Si consideramos un suceso con una probabilidad de ocurrencia P y un daño o severidad S, el riesgo vendrá definido por el producto de esta probabilidad por el efecto o magnitud del daño. Es decir que $R = P \times S$, siendo $0 \leq P \leq 1$. Una definición equivalente y de uso más extendido se obtiene sustituyendo la probabilidad por la frecuencia: $R = F \times S$. En este caso F representa la esperanza matemática de la pérdida en un determinado periodo de tiempo o lo que es lo mismo, la probabilidad de ocurrencia de la pérdida en dicho periodo.

Estos efectos se pueden medir en distintas unidades: en términos económicos, en pérdida de vidas humanas, en daños personales, etc. Así si un accidente se produce con una frecuencia de una vez cada 10 años y provoca en cada ocasión treinta muertos, el riesgo será de:

$$R=(1/10) \times 30 = 3 \text{ muertos/año}$$

Si para este mismo accidente, las pérdidas económicas ascienden a 500 millones de dólares, el riesgo será:

$$R=(1/10) \times 500 = 50 \text{ millones de dólares/año}$$

Obviamente, para reducir el riesgo se puede actuar sobre las dos variables, bien reduciendo las probabilidades de ocurrencia, bien reduciendo la magnitud esperable del daño, bien actuando sobre las dos. Para algunos autores, disminuir la probabilidad es PREVENCIÓN y disminuir la gravedad de los efectos es PROTECCIÓN.

La sencillez matemática de esta expresión está reñida, sin embargo, con su utilidad práctica. En primer lugar, es preciso identificar todos y cada uno de los peligros presentes en una instalación industrial y después conocer la frecuencia con la que ocurrirá un evento (en el contexto del análisis de riesgos será siempre un evento no deseado), y la magnitud del daño que se producirá. Esta tarea es muy costosa en términos de tiempo y recursos a emplear. De hecho, algo tan aparentemente simple como conocer estas dos magnitudes ha obligado al desarrollo de un sinfín de metodologías encaminadas a su estimación más o menos precisa.

El objetivo de este apartado es describir de forma somera las principales técnicas hoy por hoy disponibles para identificar peligros y/o evaluar riesgos, ya sea bajo una perspectiva cualitativa, ya sea mediante el uso de métodos cuantitativos o semicuantitativos [SEGURITECNIA 1996] [SEGURITECNIA 1996-2] [SEGURITECNIA 1996-3] [SEGURITECNIA 1997] [SEGURITECNIA 1997-2] [SEGURITECNIA 1997-3]

1.2.2. Análisis histórico de accidentes

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

Para llevar a cabo estos trabajos se dispone de bancos de datos informatizados, recopilaciones bibliográficas de accidentes o incluso de la propia experiencia siniestral de la empresa.

Es una metodología simple y económica, ya que no compromete muchos recursos materiales o humanos. Su gran ventaja es que detecta peligros absolutamente reales, que ya en el pasado se han puesto de manifiesto. Sin embargo, las informaciones recogidas son limitadas dado que sólo se registran los accidentes que acaban en eventos de relativa importancia y se obvian incidentes, potencialmente más peligrosos que los anteriores, pero que por circunstancias fortuitas favorables no desencadenan un gran accidente. Asimismo, las informaciones recogidas no son completas y están afectadas de imprecisiones importantes, lagunas y datos confidenciales desconocidos.

1.2.3. Análisis preliminar de peligros

Este método es similar al análisis histórico de accidentes, aunque no se basa en el estudio de siniestros previos sino en la búsqueda bibliográfica de peligros que puedan

hallarse presentes en una nueva instalación a partir de la lista de productos químicos presentes. De forma no estricta se le suele denominar también "Análisis preliminar de riesgos".

El procedimiento consiste en obtener información completa sobre materiales, sustancias, reactivos y operaciones previstas, comparar estos procesos con otros de los que se tenga experiencia anterior, adaptar esas semejanzas al caso actual y analizar las operaciones y equipos previstos desde el punto de vista de los peligros presentes en cada uno (toxicidad, corrosividad, carga energética, etc.).

Los puntos críticos que se hayan detectado en el paso anterior deben ser objeto de un estudio técnico algo más detallado. Por último, como resulta lógico, deberán proponerse las medidas a adoptar para disminuir o eliminar los peligros detectados.

Es un procedimiento de análisis simple y económico, aunque no sistemático; es estrictamente cualitativo y depende en exceso de los conocimientos previos de los ejecutantes.

Resulta idóneo para instalaciones en fase de anteproyecto o ingeniería básica, cuando aun no se han desarrollado planos detallados de la instalación.

1.2.4. Análisis "¿Qué pasa si…?"

El objetivo fundamental de este método es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstos, intentando evitar aquellos eventos que puedan resultar no deseables. Básicamente consiste en responder cualitativamente a una batería de preguntas del tipo “¿Qué pasa si…?”, en relación con la calidad o la concentración de las materias primas, o en relación con las variables de proceso o los servicios necesarios.

Para llevar a cabo este análisis de forma estructurada se recomienda seguir la línea de proceso, desde la recepción de materiales hasta la entrega del producto terminado. En una primera fase se pide a los participantes que planteen cualquier pregunta del tipo “¿Qué pasa si…?” en relación con cada unidad o etapa del proceso. Una vez recopiladas todas estas cuestiones, se intentará dar respuesta a cada una de ellas, con la participación de especialistas si fuera necesario.

Una vez identificados los peligros y sus posibles consecuencias, deben proponerse las medidas disponibles para minimizarlos, tales como alternativas en el proceso o modificaciones de la línea de producción.

Resulta un sistema muy creativo y de simple aplicación (y por lo tanto, económico). Sin embargo, aún realizándose de modo estructurado puede pasar por alto algunos peligros menos evidentes pero no por ello menos graves.

1.2.5. Análisis mediante listas de comprobación

Consiste en contrastar la realidad de la planta con una lista muy detallada de cuestiones relativas a los más diversos ámbitos, tales como condiciones de proceso, seguridad o estado de las instalaciones o servicios [APA 1980] [D.G.P.C. 1990] [D.G.P.C. 1990-2].

En primer lugar es necesario disponer de listas de comprobación o “check list” generalistas o específicamente desarrolladas para esa planta en concreto. Cabe también generar estas listas con un planteamiento global o bien por ámbitos (instrumentación, equipos, materias peligrosas, condiciones de trabajo, etc.).

A la hora de aplicar el análisis, basta con seguir la lista de referencia y responder a todas y cada una de las cuestiones planteadas, obteniendo así un perfil sobre el cumplimiento de los criterios de seguridad de la planta analizada.

Es un procedimiento fácil y controlado. Está especialmente adaptado para garantizar el cumplimiento de normas o reglamentos técnicos y permite la reproducibilidad del análisis de forma periódica, permitiendo estudiar las desviaciones que se producen en el tiempo. No obstante, dependiendo de la calidad de la lista de comprobación o del grado con que se adapte a la planta analizada puede pasar por alto peligros evidentes no contemplados en las listas o incidir excesivamente en puntos que sin lugar a dudas no plantean peligros importantes. En este sentido, no es un método creativo.

1.2.6. Análisis de los modos de fallos y sus efectos[4]

Denominado también "Análisis modal de fallos y efectos" o AMFE, es una técnica muy utilizada en los sistemas de calidad para identificar causas de fallos.

El AMFE persigue establecer los posibles fallos de todos y cada uno de los elementos de la planta, analizando las consecuencias y considerando aquellas que puedan desencadenar un accidente, sugiriendo las medidas a adoptar para controlar tales situaciones de peligro.

Se inicia el estudio identificando todos los equipos de la planta y estableciendo sus condiciones normales de proceso. A continuación, para cada equipo, se detallan todos y cada uno de los fallos posibles y se analizan sus posibles consecuencias. Si se da la circunstancia de que una situación de fallo en un equipo produce una alteración en otro, debe trasladarse esta influencia al estudio del equipo afectado.

Una vez conocidas las consecuencias, se deben proponer las acciones de mejora necesarias para eliminar o reducir el peligro.

En general para cada elemento se cumplimenta una tabla con las siguientes columnas: elemento, descripción del equipo, modo de fallo, forma de detección del fallo, efectos del fallo y medidas correctoras.

Requiere poca información y es relativamente económico. Es un análisis cualitativo (aunque admite cierto tratamiento semicuantitativo). Su principal inconveniente es que no contempla la posibilidad de fallos combinados o en secuencia.

1.2.7. Análisis de peligros y operabilidad[5]

Algunos autores [BESTRATÉN 1993], [STORCH 1998] lo denominan AFO (Análisis funcional de operabilidad) aunque esta denominación no parece muy afortunada dado que se trata de una técnica de seguridad orientada a identificar circunstancias de

[4] En inglés se identifica como FMEA (Failure Mode and Effect Analysis).
[5] HAZOP: Hazard and Operability Analysis.

peligro y de accidente, siendo la operación (la garantía de funcionamiento) un aspecto secundario. Es por ello que resulta más apropiada una traducción del tipo "análisis de peligros y operabilidad" o "análisis de peligros y funcionalidad".

Esencialmente es un método muy similar al AMFE descrito en el apartado anterior. El HAZOP, sin embargo, es un método absolutamente sistemático, por que se controlan todas y cada una de las variables de proceso, en todos y cada uno de los equipos de la planta.

Su aplicación se fundamenta en la identificación de todos los parámetros del proceso (presión, temperatura, nivel, caudal, etc.) y sus condiciones de trabajo habituales, analizando de manera sistemática las desviaciones posibles.

Se inicia el estudio identificando los equipos y líneas principales de la planta. Para cada equipo o línea se relacionan todos los parámetros que afectan al sistema y se concretan sus condiciones habituales de proceso. A continuación y ayudados por unas palabras-guía tales como NO, MÁS, MENOS, CONTRARIO, ADEMÁS, PARTE, DIFERENTE, se intenta incentivar la creatividad de los participantes en el estudio para que identifiquen cuáles serían las consecuencias de que la variable estudiada se desviara de la condición de proceso en la forma indicada por la palabra-guía (más temperatura, menos pH, flujo inverso en bomba, etc.).

Para cada situación peligrosa identificada se propondrán las medidas correctoras oportunas en el sentido de evitar las desviaciones detectadas.

Este método requiere documentación completa y un conocimiento exhaustivo de la planta, de los productos utilizados y de las condiciones de proceso. Está especialmente adaptado a plantas relativamente complejas en las que otros métodos serían totalmente anárquicos. En particular, está mejor preparado para ser usado en plantas de trabajo en continuo, aunque se han desarrollado variantes para procesos por lotes. Su aplicación es económicamente costosa, dada la necesidad de involucrar en el estudio a un cierto número de profesionales cualificados que deberán dedicarle un tiempo considerable.

Existen en el mercado numerosos paquetes informáticos que apoyan la realización del análisis.

1.2.8. Análisis mediante árboles de fallos[6]

El Análisis mediante árboles de fallos (FTA) [PIQUE 1994] [AMENDOLA 1988] es una técnica cuantitativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado (suceso capital o "top event") a partir del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos iniciadores o causales, mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección de una secuencia lógica de sucesos, denominada árbol de fallos.

Se inicia su aplicación con la identificación de los sucesos capitales tales como “explosión de un reactor”, “fallo del compresor”, etc.

Se establecen a continuación los sucesos iniciadores que son capaces, de por sí o en combinación con otros, de desencadenar el suceso capital y se estructura el árbol de

[6] FTA: Fault Tree Analysis.

fallos mediante puertas lógicas. Se asigna a cada suceso básico la probabilidad de ocurrencia, conocida por propia experiencia o por consulta a bancos de datos sobre la materia, y por último se calcula la probabilidad de los sucesos compuestos mediante la aplicación del álgebra de Boole hasta alcanzar el suceso capital.

Asimismo, y dado que las probabilidades asignadas a cada suceso tienen un margen de incertidumbre a veces conocido, es posible estimar también la sensibilidad o grado de certidumbre del resultado final.

La utilización de este método de análisis de riesgos permite un conocimiento exhaustivo de las relaciones causa-efecto existentes entre los diversos fallos posibles del sistema y genera unas recomendaciones de mejora muy concretas (e incluso cuantificadas en cuanto a su eficacia). Sin embargo, requiere mucho tiempo y personal especializado, con un conocimiento completo de la planta en sus distintas etapas de proceso (parada, puesta en marcha, operación, emergencia, etc.).

Se recomienda su utilización en instalaciones complejas en las que concurran muchos aparatos, instrumentos, equipo de control y alarma y sistemas de seguridad. Incluso es aplicable para valorar la incidencia del fallo humano en la probabilidad del suceso capital.

Existen numerosos programas de ordenador como asistentes para el desarrollo de este tipo de análisis, con lo que se evitan algunos errores y se facilita la corrección o modificación (mantenimiento o actualización) de los árboles.

1.2.9. Análisis mediante árboles de sucesos[7]

Mediante el ETA se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que desencadena un tipo de accidente concreto [BESTRATEN 1996], estableciendo también las probabilidades de ocurrencia, si el conocimiento de los sucesos básicos lo permite. Desde un punto de vista abstracto, es similar al análisis de árboles de fallos. Sin embargo, los sucesos básicos en este caso no son fallos de los sistemas (“falla el T-302”) sino alternativas de las diferentes situaciones que pueden darse (“ignición inmediata-ignición retardada).

Para su aplicación se identifican los sucesos básicos o iniciadores y se aplican todas las disyuntivas lógicas que sean procedentes hasta obtener una representación gráfica en forma de árbol horizontal, en la quedan representadas todas las posibles evoluciones del sistema según se den o no las diferentes alternativas planteadas, hasta los sucesos accidentales finales (BLEVE, nube de gas, deflagración, dispersión, etc.)

Por su especificidad y grado de desarrollo, son aplicables a las mismas instalaciones y bajo las mismas condiciones que los árboles de fallos.

1.2.10. Análisis de causas y consecuencias

Permite un análisis cuantitativo de los eventos de fallo en sistemas complejos, partiendo de sucesos capitales y factores condicionantes, con lo que al final se obtiene un árbol de causas/consecuencias. Es una combinación de árboles de fallos y árboles

[7] Event Tree Analysis (ETA).

de sucesos por lo que también se utilizan símbolos lógicos y asignación de probabilidades a cada uno.

Se elige un suceso capital como origen de la evaluación, se identifican los sucesos condicionantes y se establece la secuencia lógica de acontecimientos incluyendo las disyuntivas existentes. En este árbol se mezclan eventos “fallos” con eventos “sucesos”.

Su aplicación requiere conocer muy bien la instalación y tener experiencia en el desarrollo de este tipo de análisis. Es laborioso y se necesita soporte informático para llevarlo a cabo. Los resultados obtenidos son muy detallados y permiten, como en el caso de los árboles de fallos y de sucesos, cuantificar la utilidad de las medidas correctoras propuestas.

1.2.11. Índices de riesgo

Son procedimientos de aplicación relativamente simple a instalaciones complejas, en las que se evalúan una serie más o menos detallada de parámetros y se cuantifican unos valores que permiten una evaluación del nivel de riesgo de la instalación analizada. Existe un buen número de ellos, cada uno con sus especificidades. Para el sector químico, los más utilizados son el "Índice de Incendio y Explosión" (desarrollado por la compañía DOW Chemical y avalado por el AIChE[8]) y el índice MOND (desarrollado por la compañía ICI). En el Capítulo 2 de esta memoria se analizan con detenimiento los índices estudiados durante el desarrollo de esta tesis.

Son métodos de aplicación simple y económica ya que con la cumplimentación razonada de una lista de comprobación, se obtienen de forma más o menos inmediata unos valores orientativos del riesgo intrínseco de la actividad e incluso pueden determinarse los factores que más contribuyen a incrementar este riesgo. Sin embargo, como se verá con más detalle, su grado de descripción de la instalación es limitado, por lo que los resultados obtenidos son genéricos y pueden pasar por alto multitud de factores, agravantes o no.

1.3. OBJETIVO, ÁMBITO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

Entre los diversos métodos de análisis de riesgos citados en la sección 1.2 destaca el análisis histórico de accidentes por su potencial no suficientemente utilizado. Pese al notable incremento que tanto en cantidad como en calidad han experimentado los bancos de datos informatizados en los últimos años, el análisis histórico sigue siendo considerado una técnica cualitativa que permite únicamente la identificación elemental y no sistemática de peligros. La información cuantitativa que puede aportar el análisis histórico no ha sido, hasta la fecha, suficientemente valorada.

El objetivo final de la presente tesis es aplicar un tratamiento cuantitativo, mediante procedimientos estadísticos, a un conjunto de informaciones recopiladas sistemáticamente sobre accidentes industriales en los que han intervenido sustancias peligrosas, para poder predecir la gravedad de estos accidentes en función de diversos factores, o, cuanto menos, determinar qué factores son los más significativos o influyentes en la severidad de estos eventos.

[8] AIChE: American Institute of Chemical Engineers.

Las variables utilizadas como medida de la gravedad de cada evento han consistido, primordialmente, en el número de personas muertas o heridas y el importe económico del daño causado. En algunas circunstancias (Capítulo 4) también se han considerado el número de evacuados. No obstante, la información relativa al número de muertos es, con mucha diferencia, la más consistente y que mejores resultados aporta.

Los resultados obtenidos están avalados por un volumen importante de accidentes tomados como referencia y por un tratamiento estadístico riguroso. Su uso permitiría hacer estimaciones más fiables y ajustadas a la realidad en lo relativo a la gravedad de los eventos estudiados.

Se ha analizado también la posibilidad de extraer de los registros publicados conclusiones sobre la frecuencia de determinadas tipologías de accidente. Pese a que la información disponible al efecto es muy limitada y sesgada, lo que dificulta su utilización en este sentido, ha sido posible obtener árboles de sucesos correspondientes a accidentes con sustancias inflamables y estimar las diferentes probabilidades de ocurrencia de cada categoría o secuencia.

Se centra este estudio en los accidentes acaecidos en las instalaciones fijas de la industria química en los que han intervenido sustancias peligrosas. Se descarta por tanto incluir en el mismo los riesgos asociados al transporte de mercancías peligrosas, aunque sí se han tenido en cuenta los conocimientos existentes en este ámbito en el desarrollo de los estudios preliminares.

Además, se enfoca el análisis a la evaluación del riesgo catastrófico, es decir, aquel que afecta seriamente a la continuidad operativa de las instalaciones y que incluso puede afectar a otras zonas colindantes. En general, son ejemplos característicos de este tipo de eventos las explosiones, los incendios, las fugas, los derrames, etc. Es decir, aquellos accidentes que en la directiva 96/82/CE reciben la denominación de "accidentes graves". Concretamente, se considera que quedan fuera del ámbito de este estudio los riesgos de seguridad y salud laboral.

Para la consecución de los objetivos, la presente tesis se estructura en tres bloques claramente diferenciados. El primero de ellos constituye una recopilación bibliográfica en el ámbito de los distintos aspectos que afectan a esta materia. Así, el Capítulo 2 hace referencia a los factores de riesgo, y en él se comparan y analizan la forma en la que cada variable puede afectar a la severidad de las consecuencias. El Capítulo 3 está dedicado a las bases de datos y otras fuentes de información disponibles para la realización del análisis histórico de accidentes industriales con sustancias peligrosas.

El segundo bloque (Capítulos 4 y 5), en el que se muestra el estudio teórico objeto de esta tesis, recoge los análisis realizados sobre un conjunto muy significativo de accidentes. En él se presentan los estudios estadísticos previos y el tratamiento de la información que se ha realizado para poder llevarlos a cabo.

Por último, el tercer bloque (Capítulo 6) recoge la aplicación de esta metodología a la resolución de tres cuestiones concretas relacionadas con los accidentes con sustancias peligrosas. La primera tiene por objeto predecir los costes derivados de los accidentes y su evolución en el tiempo. La segunda permite estimar el número de muertos derivado de las explosiones accidentales que puedan ocurrir y la tercera supone una primera aproximación a los árboles de sucesos para accidentes con sustancias inflamables con la finalidad de establecer la probabilidad de ocurrencia de los distintos accidentes posibles.