
Introducción y conceptos generales

«En el verano de 1986 pasé algunos meses en BASF, trabajando en un proyecto de simulación por ordenador. Un día me visitó Joe Louvar, Director de Ingeniería Química, quien me preguntó si estaría interesado en trabajar en proyectos relacionados con temas de seguridad. En total ignorancia repliqué: ¿Te refieres a cascos y botas de seguridad? Joe, a continuación, me explicó algunos de los aspectos más fundamentales de la seguridad, incluyendo dinámica de reactores, flujo bifásico durante el venteo de recipientes sobrepresurizados, modelos de dispersión de gases...»

Prof. Daniel A. Crowl (Wayne State University).
Chemical Engineering Education 22, 74 (1988).

Introducción

Durante los últimos cincuenta años la industria química ha experimentado cambios de gran importancia. A medida que los avances tecnológicos han dado origen a la aparición de nuevos materiales, procesos e incluso nuevas industrias, hemos asistido a un aumento casi exponencial en el número y aplicaciones de los productos químicos disponibles en el mercado. Cada año, cientos de nuevos productos se incorporan a las decenas de miles ya existentes en el mercado de aplicaciones actual. A pesar de la enorme diversificación de la oferta, un 90 por 100 del consumo está concentrado en un 5 por 100 de los productos.

Por otro lado, hoy en día existen plantas químicas de gran tamaño, habiéndose incrementado en un orden de magnitud la capacidad de algunas unidades en los últimos veinte años. Como es lógico, este crecimiento, tanto en número de industrias como en la capacidad de éstas, ha aumentado el número de personas (dentro de las plantas de proceso y entre el público en general) que pueden estar expuestas a las consecuencias de un accidente industrial. Esto, a su vez, ha propiciado una toma de conciencia sobre seguridad industrial que de algún modo

ya se extiende al público en general. La Administración en sus distintos niveles ha ido respondiendo a esta creciente sensibilidad social realizando un esfuerzo importante para regular las actividades de la industria en general, y en particular de aquellas industrias que pueden presentar un mayor riesgo.

A la hora de expresar con estadísticas el nivel de accidentabilidad hay que comenzar por decir que la industria química posee un registro de seguridad considerablemente más alto que el promedio del conjunto industrial. Las estadísticas más utilizadas para la comparación son los índices FAR (*Fatal Accident Rate*), que establecen el número de accidentes mortales en una industria determinada tras 10^8 horas de actividad (un período que corresponde aproximadamente a la vida laboral de un grupo de 1.000 trabajadores). Para la industria química el valor del índice FAR se sitúa entre 4 y 5. En comparación, un grupo equivalente de trabajadores sufriría 10, 12 y 64 bajas en la agricultura, minería y construcción, respectivamente. Para situar la cifra de accidentes en la industria química en un contexto adecuado es necesario, además, tener en cuenta que por lo general en torno al 80 por 100 de los accidentes en la industria química pueden adscribirse al grupo de accidentes no específicos, es decir, caídas, choques, contusiones, etc., por lo que sólo un 20 por 100 de las bajas son debidas a riesgos específicos de la industria química. Otra manera de visualizar el nivel de accidentabilidad asumido por los trabajadores de la industria química es la siguiente (1): Un trabajador que pase toda su vida laboral en una industria química de 1.000 empleados será testigo de unos cuatro accidentes mortales en la propia industria. En comparación, durante ese tiempo unos 20 trabajadores de la plantilla morirán en otros tipos de accidentes (fundamentalmente en las carreteras y en sus hogares), y unos 370, de enfermedades diversas, incluyendo 40 como consecuencia directa del uso del tabaco.

La mayoría de los accidentes a que se refiere lo anterior son sucesos individuales, que involucran una o pocas personas, casi siempre en el interior de la planta. A pesar de que, como se ha visto, la industria química tiene un registro de accidentes inferior al de otras actividades industriales, la percepción del público en general es que se trata de una industria de alto riesgo. Así, una encuesta (2), relativamente reciente, muestra que la creencia general es que «casi todos los productos químicos son muy peligrosos...» y «dos de cada tres norteamericanos esperan un accidente desastroso en la industria química, con miles de muertos en los próximos cincuenta años».

Sin duda, la principal causa de esta percepción es la resonancia que han tenido en la sociedad los llamados accidentes mayores, algunos de los cuales han traspasado con creces los límites físicos de las industrias involucradas. No es difícil construir, repasando recortes de prensa en las últimas décadas, una relación de accidentes que han producido importantes pérdidas, tanto humanas como materiales. La tabla 1.1. muestra algunos de los accidentes industriales de mayor impacto, relacionados con la fabricación, uso y transporte de productos químicos. A la relación de los accidentes que dan origen a titulares de prensa habría que añadir otra, más extensa y de menor eco en los medios de comunicación, en la que se relacionarían los accidentes individuales antes mencionados, las enfermedades profesionales, alteraciones en el bienestar y perjuicios de diversa naturaleza sufridos por quienes trabajan en entornos industriales o en sus áreas de influencia.

Tabla 1.1. Algunos accidentes industriales notables ocurridos a partir de 1974

Accidente	Consecuencias
Flixborough (UK), 1 de junio de 1974. En una planta de Nypro la rotura de una tubería provoca la descarga de unas 80 toneladas de ciclohexano líquido y caliente. La nube resultante da origen a una explosión de gran poder destructivo.	28 muertos y cientos de heridos. Destrucción completa de las instalaciones.
Seveso (Italia), 9 de julio de 1976. En una planta de Icmesa (Hoffmann La Roche), una reacción química fuera de control provoca el venteo de un reactor, liberándose unas 2 toneladas de productos químicos a la atmósfera. Entre éstos había de 0,5 a 2 kg de dioxina (TCDD), cuya dosis letal para una persona de sensibilidad promedio es inferior a 0,1 mg.	Fue preciso evacuar a más de 1.000 personas. No hubo muertes como consecuencia directa del accidente, pero la dioxina afectó a muchas personas (acné por cloro), se produjeron abortos espontáneos y contaminación del suelo.

Tabla 1.1. (Continuación)

Accidente	Consecuencias
<p>Camping de Los Alfaques, San Carlos de la Rápita (España), 11 de julio de 1978. Un camión de 39 Tm, sobrecargado con unos 45 m³ de propileno, dio origen a una explosión BLEVE al chocar con la pared de un camping.</p>	215 muertes.
<p>Cubatao (Brasil), 25 de febrero de 1974. Un oleoducto sufre daños. La gasolina que escapa se evapora y se inflama, dando origen a una gran esfera de fuego.</p>	Al menos 500 muertes.
<p>México D. F. (México), 19 de noviembre de 1984. Hacen explosión varios contenedores con G.L.P. en San Juan de Ixhuatepec.</p>	452 muertos y más de 4.200 heridos. El número de desaparecidos puede estar en torno a 1.000 personas.
<p>Bhopal (India), 17 de diciembre de 1984. Se produce un escape de gas venenoso (isocianato de metilo) en una planta de Unión Carbide que producía una sustancia insecticida. La emisión se esparce sobre una superficie de unos 40 km².</p>	2.500 muertes directas por envenenamiento y aproximadamente el mismo número en condiciones críticas. Unas 150.000 personas requirieron tratamiento médico. Se produjeron efectos a largo plazo, como ceguera, trastornos mentales, lesiones hepáticas y renales, así como malformaciones embrionarias.
<p>Guadalajara (México), 23 de abril de 1992. Se produce una serie de explosiones en cadena a lo largo de una red urbana de alcantarillado de unos 13 km de longitud, al parecer debido a veridos de combustible en los mismos por parte de la empresa Pemex.</p>	Los datos oficiales informan de 200 muertos y 1.500 heridos, 1.200 viviendas destruidas, así como 450 inmuebles comerciales. Las estimaciones de daños económicos están en torno a los 7.000 millones de dólares.

El coste de los accidentes en la industria química es difícil de cuantificar, ni siquiera en términos meramente económicos. Durante 1984,

en tan sólo 5 accidentes en la industria química se produjeron unas pérdidas directas estimadas de 268 millones de dólares. Cada año suceden cientos de accidentes menores, a menudo sin que trascienda al público general. Al coste total material directo de los accidentes es necesario añadirle el debido a las consiguientes paradas de la producción y pérdidas de materias primas y productos, el debido a los litigios y a las indemnizaciones por causa de daños a las personas o a la propiedad, así como las primas de los seguros. Un coste adicional muy considerable es la pérdida de imagen y la publicidad negativa que sufre la empresa involucrada en el accidente, aunque en la práctica esto sólo suele darse asociado a grandes catástrofes.

A la vista de lo anterior, no es de extrañar el creciente esfuerzo que la industria en general, y la química en particular, dedican a la prevención de accidentes. Se estima que la industria norteamericana en conjunto invirtió unos 7.700 millones de dólares durante 1985, en medidas para aumentar la seguridad de las instalaciones y para proteger la salud de los trabajadores. A la industria química le corresponde sin duda una parte muy significativa de esta inversión total, gracias a lo cual durante 1985 la probabilidad de accidentes mortales para el trabajador de la industria química fue la cuarta parte que para el trabajador promedio norteamericano (4).

La preocupación por los temas de seguridad en la industria química, así como por los de higiene industrial, está llamada a continuar creciendo en el futuro próximo. Entre las numerosas expresiones públicas de esta tendencia en los últimos años está la del Comité de Química de las Comunidades Europeas (3), cuyo informe dice textualmente, refiriéndose a la década de los 90: «... La seguridad y la higiene industriales importarán aún más que ahora. Habrá que prestar atención no sólo a mejorar lo relativo a la seguridad en el ámbito de la industria química... sino también al riesgo que supone su funcionamiento para la población circundante y para el medio ambiente a largo plazo. La industria química europea tendrá que desarrollar una política adecuada de disminución de riesgos... y por lo tanto habrá de desarrollar nuevos productos, tecnologías y procesos.»

Riesgos y peligros

La palabra *riesgo* suele utilizarse para indicar la posibilidad de sufrir pérdidas (5), o como una medida de pérdida económica o daño a las

personas, expresada en función de la probabilidad del suceso y la magnitud de las consecuencias (6). Corresponde en inglés al término *risk*. Por su parte, utilizamos la palabra *peligro* (*hazard*) para designar una condición física o química que puede causar daños a las personas, el medio ambiente o la propiedad (6).

Una vez hecha la distinción, es procedente señalar que en el uso cotidiano del idioma castellano a menudo los dos términos de intercambian fácilmente, y su empleo no siempre se ajusta a las definiciones anteriores. Así, con frecuencia se habla de que «existe un peligro elevado», cuando en la realidad se quiere decir que «el nivel de riesgo es alto», o se designa al análisis HAZOP como análisis de riesgos y operabilidad, a pesar de que su traducción estricta sería análisis de peligros y operabilidad. En este texto se ha procurado, en general, respetar la acepción dada anteriormente para ambos términos, salvo cuando el uso común se ha decantado por lo contrario (como ocurre con la denominación más usual para el análisis HAZOP).

Accidentes y análisis de riesgos

Cualquiera de los accidentes reseñados en la tabla 1 cae dentro de la categoría de *accidentes mayores*. Por *accidente* entendemos cualquier acontecimiento que implica una desviación intolerable sobre las condiciones de diseño de un sistema. Más específicamente, este libro está relacionado con aquellos accidentes cuyos efectos puedan tener consecuencias adversas sobre la vida, la salud o las propiedades de las personas. El Real Decreto 886/1988 sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales (la versión española de la llamada Directriz Seveso de la CEE) define los accidentes mayores como «cualquier suceso, tal como una emisión, fuga, vertido, incendio o explosión, que sea consecuencia de un desarrollo incontrolado de una actividad industrial, que suponga una situación de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, inmediata o diferida, para las personas, el medio ambiente y los bienes, ya sea en el interior o en el exterior de las instalaciones, y en el que estén implicadas una o varias sustancias peligrosas de las contempladas en este Real Decreto».

A pesar del aumento en la sensibilidad pública ante los posibles riesgos industriales que se ha señalado en la introducción, la inmensa mayoría de la sociedad es consciente de que cualquier actividad humana,

por beneficiosa que sea, conlleva ciertos riesgos. Particularizando en la industria química, está claro que, por muchas que sean las salvaguardas que se introduzcan, su actividad implica un riesgo, que sólo puede eliminarse a expensas de eliminar la industria. Puesto que es evidente que la industria química es necesaria en el mundo actual, la cuestión se reduce a decidir cuál es el nivel de riesgo aceptable en una instalación o proceso determinado, o, más exactamente, en qué medida un riesgo puede ser aceptado en virtud de los beneficios que se derivan de asumirlo. La decisión, siempre difícil, se complica aún más por una serie de factores que se dan con frecuencia, como puede ser el hecho de que los riesgos no se conozcan con la suficiente precisión, que los posibles afectados (dentro o fuera de la planta) no hayan asumido el riesgo voluntariamente, o que no dispongan de suficiente información sobre el riesgo que asumen, que las personas bajo riesgo no sean las principales beneficiarias de la actividad, etc. En otras ocasiones, puede ocurrir que las alternativas a una determinada situación sean inciertas o poco prácticas, lo que evidentemente dificulta la adopción de soluciones.

El proceso de decisión sobre el nivel de riesgo aceptable es complejo, porque los objetivos son múltiples y en ocasiones contradictorios. Es necesario tener en cuenta consideraciones humanitarias, económicas, de responsabilidad legal y de imagen pública. Así, un riesgo catastrófico se consideraría en general menos aceptable socialmente que un conjunto de riesgos de pequeña magnitud, incluso si el nivel de riesgo total absoluto para las personas y para la propiedad fuese idéntico.

Es importante distinguir entre el riesgo que objetivamente existe, con una cuantificación determinada, y el riesgo percibido por los posibles sujetos pasivos. Así, es bien conocido que la familiarización con una actividad peligrosa determinada reduce el nivel de riesgo percibido. Esto beneficia industrias tradicionales (agricultura, construcción) frente a industrias nuevas (química, nuclear), en las que la aceptación social es menor, incluso a pesar de que la accidentabilidad es mucho mayor en las primeras. Obviamente, hay un factor adicional en esta percepción. Sea cual sea el número anual de víctimas en actividades agrícolas, sabemos que raramente afectan a personas distintas de las que están directamente involucradas. Sin embargo, es evidente que en industrias como la química o la nuclear el potencial de daño puede exceder considerablemente los límites de la planta accidentada.

Parece claro que un cierto nivel de riesgo voluntario es asumido como parte de la manera de vivir por la mayoría de los ciudadanos,

incluso riesgos estadísticamente nada despreciables, como fumar o escalar montañas. En cambio, la tolerancia hacia los riesgos involuntarios es mínima, incluso si éstos son mucho menores que los asumidos voluntariamente. En la misma línea se aceptan con cierta facilidad los riesgos sobre los que se puede ejercer control (como, por ejemplo, la conducción de automóviles), pero se tiende a rechazar otros (riesgos por la proximidad de centrales nucleares, accidentes de ferrocarril, contaminación industrial), sobre los cuales el control que el sujeto pasivo puede ejercer es mínimo o inexistente. Parece claro también que los riesgos derivados de la naturaleza, como los debidos a terremotos, rayos o inundaciones, se aceptan más fácilmente que los derivados de actividades humanas, en virtud de la «inevitabilidad» de los primeros.

Finalmente, está la cuestión de los beneficiarios del riesgo. Siguiendo con el caso anterior, no hay necesidad de recordar que la existencia del tráfico rodado implica miles de víctimas al año en accidentes de carretera. Sin embargo, los beneficios del transporte son tan obvios que nadie piensa en prohibir la construcción de nuevas carreteras o en oponerse a la ampliación del parque automovilístico mediante una ley que reduzca el número de coches que puedan fabricarse. Los beneficios de la industria química no son tan obvios para el gran público. El mercado primario de las industrias químicas son, en general, otras industrias antes que el consumidor final. Así, el ciudadano medio se mueve en un mundo de marcas registradas y productos de gran consumo, y (salvo excepciones representadas por productos concretos, como la gasolina, o generales, como «plásticos») no identifica los productos que utiliza en la vida diaria con la industria química, lo que hace más difícil la percepción del beneficio de esta actividad industrial.

Cuantificación del nivel de riesgo

Si aceptamos como premisa que es imposible la eliminación total del riesgo, persiste la pregunta básica: ¿Cuánta seguridad implica «suficientemente seguro»? En muchos casos el nivel de entendimiento científico de los procesos involucrados y la falta de datos disponibles hacen que sea imposible dar con certeza una respuesta a esta pregunta. A pesar de ello, la Administración ha de emitir normas para la protección del público, autorizar o no nuevos productos y plantas químicas, limitar niveles de exposición en el medio ambiente y regular la eliminación de

residuos. La incertidumbre existente implica que en algunos casos se legisla para proteger contra circunstancias extremadamente improbables (*worst case scenarios*), de lo que resulta una asignación desproporcionada de recursos, disminución en las innovaciones tecnológicas y costes excesivos. Al mismo tiempo es posible que se pasen por alto situaciones más probables que deberían haber sido reguladas (2).

Para poder decidir sobre si un riesgo es o no aceptable, se requiere estimar de alguna forma su magnitud, lo que implica un análisis previo. Analizar riesgos significa desarrollar una estimación cuantitativa del nivel de peligro potencial de una actividad, referido tanto a personas como a bienes materiales, en términos de la magnitud del daño y la probabilidad de que tenga lugar. El «análisis de riesgos» (*Risk Analysis*) es una disciplina que combina la evaluación ingenieril del proceso con técnicas matemáticas que permiten realizar estimaciones de frecuencias y consecuencias de accidentes. Los resultados del análisis de riesgos se utilizan para la toma de decisiones («gerencia o administración de riesgos»: *Risk Management*), ya sea mediante la jerarquización de las estrategias de reducción de riesgos o mediante la comparación con los niveles de riesgo fijados como objetivo en una determinada actividad. Los elementos principales de un programa de administración de riesgos se esquematizan en la tabla 1.2.

El análisis de riesgos permite, dentro de los niveles de incertidumbre asociados a cada tipo de análisis empleado y a los datos disponibles,

Tabla 1.2. Elementos de un sistema de gerencia de riesgos (basado en la referencia 7)

GERENCIA DE RIESGOS

- Identificación de peligros.
- Análisis de consecuencias.
- Evaluación del riesgo.
- Entrenamiento de los trabajadores.
- Control del diseño de modificaciones.
- Procedimientos de operación.
- Procedimientos de mantenimiento.
- Investigación de accidentes/incidentes.
- Auditorías de seguridad.
- Registro y archivo.
- Planes de emergencia.

cuantificar el potencial de accidentes existente en una determinada instalación o proceso, y, supuesto que éste se considere demasiado elevado, comparar las distintas alternativas de solución. Como es lógico, cada una de ellas implicará un coste económico diferente, que también debe ser tenido en cuenta en la decisión final. Llegados a este punto, conviene clarificar algunos conceptos. Supongamos que el resultado de nuestro análisis de riesgos es que es de esperar que en la instalación en estudio se produzca una explosión una vez cada quinientos años, con un 30 por 100 de probabilidades de que alguien muera en el accidente. El análisis no nos dice si este riesgo es aceptable o no. Lo que nos da es una cifra que podemos comparar con otras, y que podemos modificar añadiendo medidas suplementarias de seguridad (por ejemplo, una opción A, que reduce la cifra a una vez cada ochocientos años, con un coste determinado, y una opción B, con un coste mayor, que rebajaría la frecuencia esperada a una vez cada mil años). Puesto que hay que aceptar algún nivel de riesgo, el análisis de riesgos nos permite priorizar las inversiones en seguridad, distribuyendo la financiación disponible de la manera más eficaz.

Rentabilidad del análisis de riesgos

Los recursos económicos en cualquier actividad son limitados y, como se ha señalado, el análisis de riesgos es una herramienta valiosa en la toma de decisiones en cuanto al destino de los fondos disponibles para inversiones en seguridad. Dado el coste económico que los accidentes tienen para la industria, está claro que, incluso si no hubiese riesgo para la vida o salud de las personas, un cierto nivel de inversión en seguridad se justificaría simplemente aplicando criterios de rentabilidad. Es la zona 1 de la figura 1.1, en la que con una inversión pequeña se consiguen beneficios importantes, obteniendo una alta rentabilidad económica capaz de competir ventajosamente con otras inversiones posibles. En la zona 2, aunque la inversión sigue siendo provechosa, probablemente no podría justificarse como tal inversión frente a otras de mayor rentabilidad aduciendo únicamente razones económicas. A pesar de ello, está claro que la mayor parte de las empresas industriales invierten también en la zona 2. Aquí entran en juego otras razones de difícil o imposible cuantificación (razones éticas, de imagen de la empresa, etc.), pero sin duda de gran importancia. Estas mismas razones

pueden aconsejar seguir invirtiendo en seguridad, aunque la inversión deje de tener una rentabilidad aceptable, con lo que se entraría en la zona 3. Elevar el nivel de inversión hasta entrar en la zona 4 implicaría dejar de ser competitivos con las industrias del sector. Si el estado de una empresa en particular es tal que las inversiones requeridas en seguridad son de esta magnitud, la opción habitual es el cese de la actividad industrial.

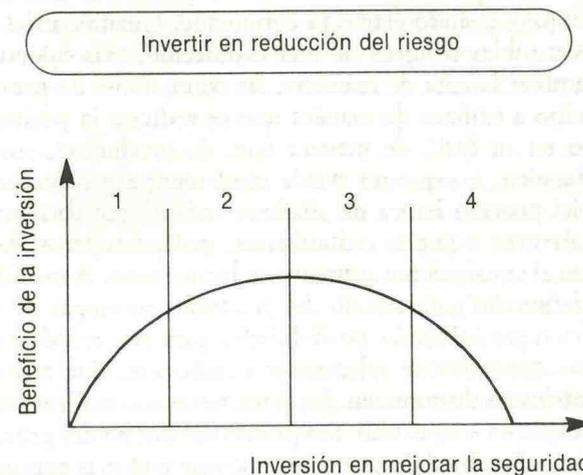


Figura 1.1. Diagrama de beneficios de las inversiones en reducción del riesgo de accidentes. (Adaptado de la referencia 1.)

Es importante señalar que, en cualquier decisión que se toma acerca de las características que ha de tener una instalación determinada, se está realizando un análisis de riesgo, explícita o implícitamente. Kletz (1) lo expresa de la manera siguiente: «Cuando se considera la cuestión de determinar la altura de las barandillas en un lugar de trabajo, la ley no nos pide que comparemos el coste de instalarlos con el valor de las vidas de las personas que podrían caer, sino que fija una altura para las mismas (entre 36 y 45 pulgadas). Se ha realizado un análisis de riesgos intuitivo que indica que, si bien con barandillas de esta altura la probabilidad de caída no es nula, es tan pequeña que se justifica el ignorarla.» Como es lógico, en decisiones que no son obvias se requiere un análisis

formal, que tenga en cuenta la complejidad de las distintas opciones que se plantean.

Como se ha visto, el análisis de riesgos aplicado a una industria existente ayuda a identificar y delimitar las distintas zonas que aparecen en la figura 1.1, y a tomar las decisiones correspondientes. Sin embargo, su mayor potencial se centra en la aplicación a plantas aún no construidas. La oportunidad para la implementación de seguridad intrínseca (de la que se hablará en capítulos posteriores) en el proceso es máxima, y con un coste mínimo, cuando éste está definiendo. Cuando antes se identifiquen los posibles peligros de una instalación, más oportunidades habrá de cambiar la ruta de reacción, las condiciones de proceso o el tipo de equipo a utilizar de manera que se reduzca la posibilidad de accidente, o en su caso, de manera que, de producirse, sus efectos queden mitigados. Lo que no pueda implementarse como seguridad intrínseca del proceso habrá de añadirse como seguridad extrínseca: controles, alarmas, equipos redundantes, procedimientos de seguridad, etc., con el consiguiente aumento en la inversión. A medida que se pasa de la definición y desarrollo del proceso a las etapas de diseño y construcción sigue habiendo posibilidades para seguridad extrínseca, pero las oportunidades de seleccionar condiciones que aumenten la seguridad intrínseca disminuyen. Es, pues, necesario realizar un análisis básico de riesgos en etapas muy tempranas del diseño del proceso, que se irá sofisticando a medida que éste se define con más precisión.

Etapas en el análisis de riesgos

Un análisis de riesgos orientado a la prevención de accidentes implica, con carácter general, las etapas siguientes:

1. Identificación de sucesos no deseados, que pueden llevar a la materialización de un peligro.
2. Análisis de los mecanismos por los que estos sucesos tienen lugar.
3. Estimación de los efectos no deseados y de la frecuencia con que pueden producirse.

De manera conceptual, el análisis de riesgos se desarrolla en distintas etapas, en cada una de las cuales se responde a una pregunta general, como se indica en la figura 1.2.

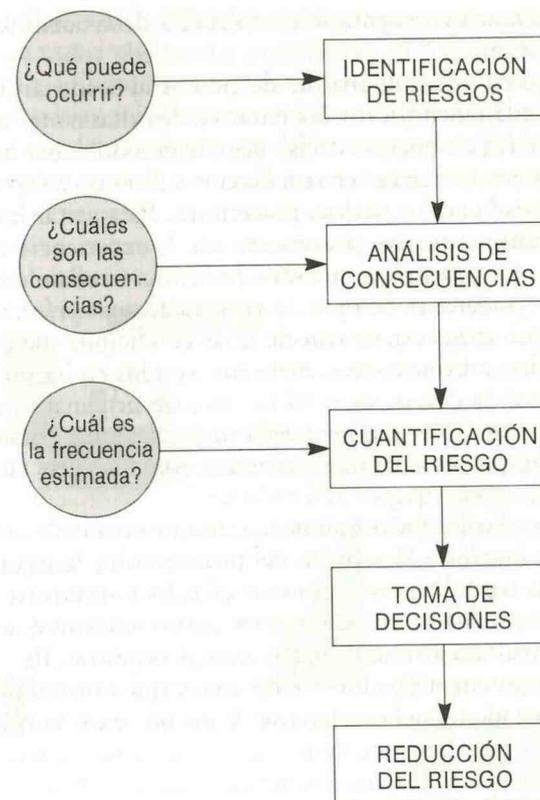


Figura 1.2. Etapas del análisis de riesgos.

La primera pregunta «¿Qué puede ocurrir?» se refiere en principio a todas las circunstancias que pueden dar origen a efectos adversos. Puede escribirse con más propiedad como: «¿Qué puede ir mal?». La naturaleza de la cuestión es puramente cualitativa, y da origen al bloque de identificación de posibles riesgos. En esta fase del estudio se pretende obtener una lista, exhaustiva dentro de los límites del análisis, de todas las desviaciones que: *i*) puedan producir un efecto adverso significativo y *ii*) tengan una probabilidad razonable de producirse. En cuanto a este apartado, deben retenerse en una primera fase todas las desviaciones cuya ocurrencia tenga visos de probabilidad, incluso si ésta parece

pequeña (aunque no despreciable). Para ello debe acudir al sentido común ingenieril, y a la experiencia acumulada sobre el proceso en estudio y sobre otros similares, lo que permitirá descartar, sin un razonamiento matemático previo, las desviaciones altamente improbables. La identificación de circunstancias que pueden dar lugar a desarrollos peligrosos es crucial: un peligro no identificado es un peligro que no va a ser considerado en los análisis posteriores. Para evitar las omisiones en este apartado se cuenta obviamente con la experiencia del personal involucrado, pero además la industria ha ido desarrollando una serie de herramientas poderosas: códigos de diseño y buenas prácticas, listas de comprobación, datos específicos de fallo de equipos y componentes, análisis histórico de incidentes, métodos basados en índices de riesgo, análisis general de desviaciones (*What-if analysis*), análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP), análisis de modos de fallo y sus efectos (FMEA), etcétera. Algunos de estos métodos serán descritos con cierto detalle en el capítulo siguiente.

Una vez identificadas las circunstancias que razonablemente pueden dar origen a efectos adversos de cierta magnitud, la siguiente etapa viene marcada por la segunda pregunta: «¿Cuáles son las consecuencias?». Para responder, es necesario tener un modelo o modelos que relacionen la causa original identificada con los efectos previstos, de manera que éstos puedan ser cuantificados. Existe una etapa, a menudo no explicitada, en la que se efectúa la selección de los modelos pertinentes. Así, un mismo incidente (p. ej., la ruptura de un tanque conteniendo líquido inflamable bajo presión) puede tener distintas evoluciones (explosión de nube de vapor no confinada, incendio «flash», BLEVE, formación y dispersión de la nube sin que ocurra ignición, etc.). Las diferentes posibilidades deben ser analizadas con los modelos apropiados, que en cada caso proporcionarán una estimación de las consecuencias que cabe esperar sobre el personal o las instalaciones. Las acciones evasivas y/o las medidas de protección que se consideren pueden incluirse en el modelo, modificando así los resultados del análisis. Los modelos para estimar las consecuencias de los distintos tipos de accidente se describen en los capítulos 3 a 5. Como ejemplo de los resultados de un análisis de este tipo, la figura 1.3 muestra el resultado de una hipotética modelización del escape de una sustancia peligrosa del complejo industrial situado en el extremo superior izquierdo del diagrama. Para unas circunstancias determinadas, los modelos disponibles predicen la intensidad y duración del escape y la extensión de las zonas afectadas. Así en la figura se ha

representado el contorno hipotético de la zona que, a un tiempo dado, presentaría concentraciones de una sustancia inflamable por encima del límite inferior de inflamabilidad (L.I.I.). De igual manera, para una emisión tóxica podrían calcularse los contornos para diferentes niveles de referencia, como la concentración TLV o un valor IDLH.

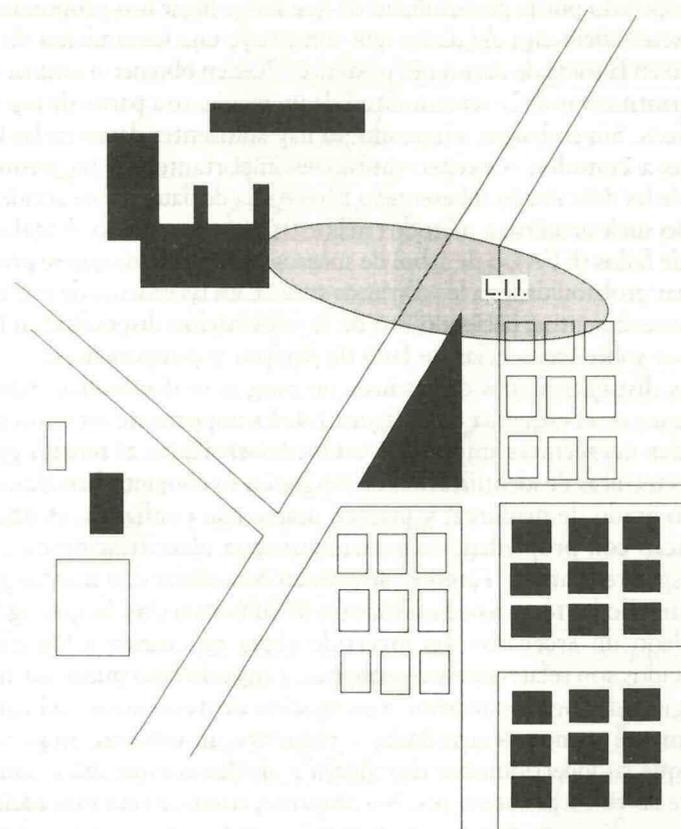


Figura 1.3. Se ha producido el escape de una sustancia peligrosa en la planta química situada en el extremo superior izquierdo del diagrama. La nube formada se propaga en la dirección del viento, pudiendo afectar a áreas habitadas. Los modelos de análisis de consecuencias predicen las zonas que en un momento determinado del accidente presentan valores de concentración por encima de un cierto nivel.

La tercera etapa del análisis de riesgos tiene como objetivo responder a la pregunta: «¿Con qué frecuencia?». Una vez identificados los sucesos que pueden dar origen a daños importantes, y estimada la magnitud de éstos, procede cuantificar la verosimilitud de dichos sucesos, ya sea en términos de su frecuencia o de la probabilidad de que tengan lugar durante la vida estimada de la instalación. El producto de la magnitud del daño esperado por la probabilidad de que tenga lugar nos proporciona la *esperanza matemática del daño*, que constituye una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones posterior. Pueden obtenerse estimaciones semicuantitativas de la verosimilitud de un incidente a partir de registros históricos. Sin embargo, a menudo no hay suficientes datos en las bases abiertas a consulta, o existen omisiones importantes en las mismas, a causa de las dificultades inherentes a la recogida de datos sobre accidentes. Por ello suele acudir a métodos más estructurados, como el análisis de árbol de fallos (FTA), o de árbol de sucesos (ETA), en los que se procede a asignar probabilidades a los distintos sucesos en las cadenas de evolución de acontecimientos, haciendo uso de la información disponible en bases de datos sobre frecuencias de fallo de equipos y componentes.

Las distintas etapas del análisis de riesgos se desarrollan más ampliamente en el esquema de la figura 1.4. Es importante reconocer que no todas las técnicas implicadas están desarrolladas al mismo grado. Así, las técnicas de identificación de riesgos en su conjunto han alcanzado un alto grado de madurez, y pueden usarse con confianza, es decir, si se aplican con propiedad, debe conseguirse la identificación de todos los riesgos relevantes. También se pueden considerar con un alto grado de desarrollo las técnicas de estimación de consecuencias, lo que significa que, dado un escenario, las incertidumbres en cuanto a los efectos producidos son relativamente pequeñas, y en todo caso puede estimarse su magnitud. Por el contrario, la estimación de frecuencias está comparativamente menos desarrollada, y requerirá un esfuerzo importante hasta que su incertidumbre disminuya a niveles comparables similares a los de las técnicas anteriores. No obstante, como se verá más adelante, existe una base de datos cada vez más amplia, que permite estimar frecuencias y probabilidades de fallo con cierta aproximación. Es de señalar, además, que no todas las entradas de datos tienen la misma influencia a la hora de determinar la probabilidad de ocurrencia de un accidente determinado durante un cierto período de tiempo. Por el contrario, a menudo sólo unas pocas frecuencias en la base del árbol de fallos suelen ser críticas para la precisión del resultado final.

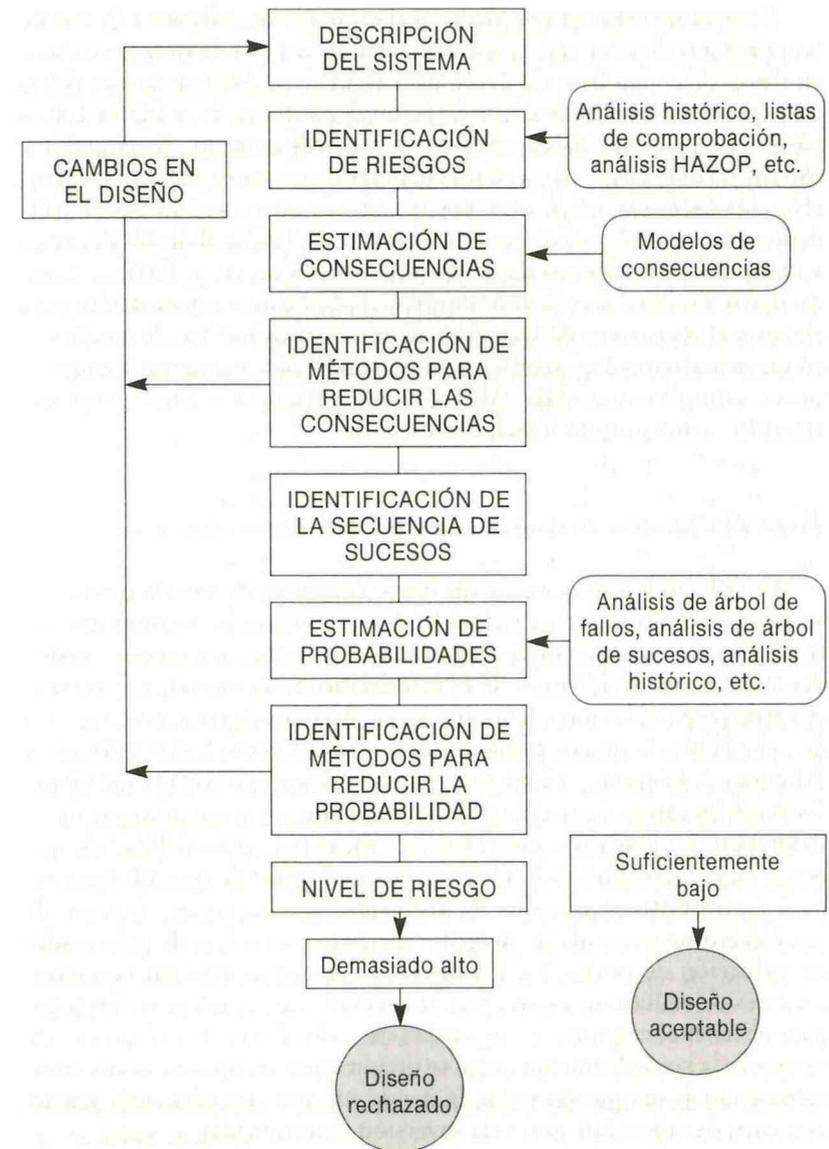


Figura 1.4. Etapas en la realización de un análisis cuantitativo de riesgos. (Adaptado de la referencia 6.)

Aunque no está contemplada en el esquema de la figura 1.4, una de las tareas a realizar en una etapa temprana del análisis de riesgos consiste en desarrollar una base de datos para el análisis. Además de los datos contenidos en el bloque de descripción del sistema de la figura 1.4, la base debe contener datos referidos a factores externos (topografía y uso del terreno circundante, datos demográficos, datos meteorológicos, servicios externos, etc.), así como a factores de verosimilitud de incidentes (datos históricos de accidentes, datos de fiabilidad de instalaciones y componentes, registro de catástrofes naturales, etc.). Existen bases de datos de libre acceso que contienen abundante información para elaborar el registro de datos en lo referente a verosimilitud de incidentes en una instalación dada o en sus componentes. Normalmente la empresa puede complementar estos datos con experiencia y datos internos, referidos a sus propias instalaciones.

Toma de decisiones en materias de seguridad industrial

Ya se ha indicado que ante un riesgo determinado cabe aceptarlo en su nivel actual o tratar de reducirlo. En todo caso, la decisión implica realizar una estimación de la magnitud de las consecuencias que pueden derivarse de un accidente y de la verosimilitud del mismo, así como el coste de las posibles medidas correctoras. Algunos de los aspectos en los que el análisis de riesgos puede resultar especialmente útil se señalan en la figura 1.5. Como se ha indicado, el análisis de riesgos permite identificar las posibles causas iniciadoras de un accidente y los mecanismos de su desarrollo, evaluar sus consecuencias y estimar la probabilidad de que tenga lugar (verosimilitud). Una vez que se dispone de esta información para los distintos escenarios de accidente, se está en condiciones de establecer una jerarquía de riesgos, reflejada en una lista de prioridades de reducción de riesgo. En los casos en los que se estimen necesarias acciones de reducción existe, por lo general, más de un procedimiento para obtener el aumento de seguridad deseado. De nuevo, el análisis de riesgos es la herramienta que permite decidir entre las opciones existentes, escogiendo la que proporciona la mayor eficacia de reducción (mayor aumento de seguridad para una inversión determinada).

Por último, y no por ello menos importante, el análisis de riesgos permite justificar las decisiones tomadas. No basta con que una decisión sea correcta, sino que debe en lo posible ser entendida como tal por los

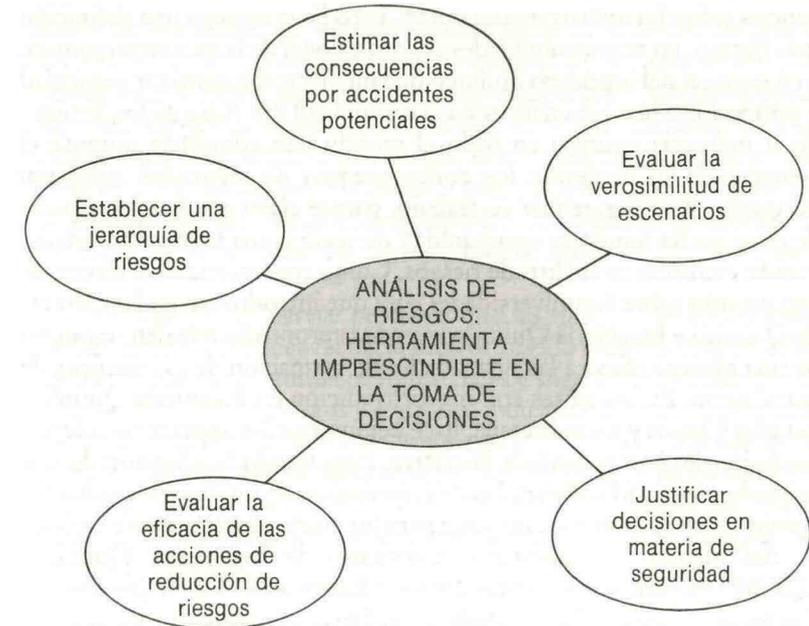


Figura 1.5. Utilidad del análisis de riesgos.

distintos estamentos afectados. Los resultados del análisis proporcionan el fundamento adecuado para explicar cuál es el nivel de riesgo a que están sometidos los trabajadores de una instalación y la comunidad circundante, lo que se ha hecho para aumentar la seguridad y por qué se ha elegido una alternativa y no otra entre las varias posibles. Si la decisión no está basada en un análisis semicuantitativo, sino que su fundamento reside en opiniones y juicios personales no sólo existirá una mayor probabilidad de error, sino que, incluso en el caso de ser correcta, será más difícil de aceptar por aquellos que pueden verse afectados por la misma.

El análisis de riesgos en la formación de los profesionales de la industria química

Cada día es mayor la importancia social de los temas referentes al medio ambiente y a la seguridad industrial, y en consecuencia las exi-

gencias sobre las industrias aumentan. Esto lleva consigo una definición más clara de las responsabilidades del profesional de la industria química, y en especial del ingeniero químico que incluyen el garantizar seguridad y protección a los trabajadores y a la comunidad (9). Aunque los técnicos de la industria química en todo el mundo han adquirido durante el ejercicio de su profesión los conocimientos de seguridad industrial necesarios para desarrollar su trabajo, parece claro que la mayor parte de ellos no ha tenido la oportunidad de recibir una formación estructurada y extensa en análisis de riesgos. Como consecuencia, se ha creado una presión sobre las universidades para que introduzcan en las carreras de Química e Ingeniería Química materias apropiadas que den respuesta de una manera eficaz a las necesidades de formación de los técnicos de la industria. En los países con mayor tradición en Ingeniería Química, Estados Unidos y Gran Bretaña, hace tiempo que los respectivos colegios profesionales han tomado la iniciativa, impulsando la adopción de materias de seguridad industrial en los *curriculum* de los nuevos graduados y promoviendo cursos de reciclaje para los profesionales ya en ejercicio.

Así, dentro del Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE) existen instituciones como la Safety and Health Division, el Center for Chemical Process Safety y el Design Institute for Emergency Relief Systems. Se ha creado asimismo un grupo especial de trabajo con la misión de identificar aspectos claves de seguridad industrial que deben reflejarse en los estudios de Ingeniería Química (8), en la línea de los requisitos impuestos por el Instituto de Ingenieros Químicos de Gran Bretaña. El análisis de riesgos debe ser la piedra angular en cualquier programa de formación en seguridad industrial, constituyendo una herramienta básica en la actividad de los ingenieros químicos.

A pesar de lo anterior, y aunque la tendencia es hacia asignaturas específicas en seguridad industrial, son aún minoritarios (en torno a un 30 por 100) los departamentos de Ingeniería Química en universidades inglesas o norteamericanas que ofrecen cursos independientes de esta materia. El resto incluyen los contenidos requeridos en otras asignaturas como el diseño de equipos e instalaciones o el laboratorio de ingeniería química. En cuanto a España, hasta la fecha los conocimientos de seguridad industrial impartidos a nivel de licenciado o ingeniero son muy escasos, aunque la reforma de los planes de estudio ofrece una oportunidad excepcional para paliar estas carencias.

Parte de las dificultades que, tanto en España como en el resto del mundo, ha tenido la seguridad en la industria química para abrirse paso

dentro de los planes de estudio pueden deberse al hecho de que la mayoría de los profesores de ingeniería química no tuvieron ocasión de abordar esas materias en su etapa como estudiantes. Otros problemas añadidos son que la investigación en este campo se circunscribe a un número muy limitado de centros, que se requiere trabajar con probabilidades y niveles de incertidumbre a menudo cuestionables y que los estudios son de naturaleza interdisciplinar, con inclusión frecuente de elementos de otras materias como biología, física de la atmósfera o derecho.

Sin embargo, no parece probable que las dificultades enumeradas puedan invertir la tendencia hacia una formación cada vez mayor de los ingenieros químicos, químicos industriales e ingenieros industriales en materias de análisis de riesgos y seguridad industrial. No sólo la necesidad de esta formación de reconoce ampliamente, sino que además estos profesionales son, por su conocimiento del proceso, de las condiciones de operación y de las técnicas y materiales involucrados, los únicos capaces de enfrentarse con éxito al problema global de la seguridad en una planta química.

Bibliografía

1. KLETZ, T.: *Hazop and Hazan. Identifying and Assessing Process Industry Hazards* (3.ª edición). The Institution of Chemical Engineers. Rugby (1992).
2. COMMITTEE ON CHEMICAL ENGINEERING FRONTIERS, NATIONAL RESEARCH COUNCIL: *Frontiers in Chemical Engineering. Research Needs and Opportunities*. National Academic Press. Washington (1988).
3. COMITÉ DE QUÍMICA DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS: «Ciencia y Tecnología Químicas: Necesidades Europeas para los años 90». *Hoja informativa de la RSEQ*. Junio, 1990.
4. NATIONAL SAFETY COUNCIL: *Accident Facts*. National Safety Council. Chicago (1985).
5. RODELLAR LISA, A.: *Seguridad e higiene en el trabajo*. Marcombo-Boixareu. Barcelona (1988).
6. CCPS (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY): *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE. Nueva York (1989).
7. DOW CHEMICAL COMPANY: *Chem. Eng. Prog.*, 86 (3), 21 (1990).
8. CROWL D. A., y LOUVAR, J. F.: *Chem. Eng. Educ.*, 22 (2), 74 (1988).
9. AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS: «AIChE Code of Ethics», en *Guide to AIChE, a handbook of AIChE members*. AIChE. Nueva York (1987).

gencias sobre las industrias aumentan. Esto lleva consigo una definición más clara de las responsabilidades del profesional de la industria química, y en especial del ingeniero químico que incluyen el garantizar seguridad y protección a los trabajadores y a la comunidad (9). Aunque los técnicos de la industria química en todo el mundo han adquirido durante el ejercicio de su profesión los conocimientos de seguridad industrial necesarios para desarrollar su trabajo, parece claro que la mayor parte de ellos no ha tenido la oportunidad de recibir una formación estructurada y extensa en análisis de riesgos. Como consecuencia, se ha creado una presión sobre las universidades para que introduzcan en las carreras de Química e Ingeniería Química materias apropiadas que den respuesta de una manera eficaz a las necesidades de formación de los técnicos de la industria. En los países con mayor tradición en Ingeniería Química, Estados Unidos y Gran Bretaña, hace tiempo que los respectivos colegios profesionales han tomado la iniciativa, impulsando la adopción de materias de seguridad industrial en los *curriculum* de los nuevos graduados y promoviendo cursos de reciclaje para los profesionales ya en ejercicio.

Así, dentro del Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE) existen instituciones como la Safety and Health Division, el Center for Chemical Process Safety y el Design Institute for Emergency Relief Systems. Se ha creado asimismo un grupo especial de trabajo con la misión de identificar aspectos claves de seguridad industrial que deben reflejarse en los estudios de Ingeniería Química (8), en la línea de los requisitos impuestos por el Instituto de Ingenieros Químicos de Gran Bretaña. El análisis de riesgos debe ser la piedra angular en cualquier programa de formación en seguridad industrial, constituyendo una herramienta básica en la actividad de los ingenieros químicos.

A pesar de lo anterior, y aunque la tendencia es hacia asignaturas específicas en seguridad industrial, son aún minoritarios (en torno a un 30 por 100) los departamentos de Ingeniería Química en universidades inglesas o norteamericanas que ofrecen cursos independientes de esta materia. El resto incluyen los contenidos requeridos en otras asignaturas como el diseño de equipos e instalaciones o el laboratorio de ingeniería química. En cuanto a España, hasta la fecha los conocimientos de seguridad industrial impartidos a nivel de licenciado o ingeniero son muy escasos, aunque la reforma de los planes de estudio ofrece una oportunidad excepcional para paliar estas carencias.

Parte de las dificultades que, tanto en España como en el resto del mundo, ha tenido la seguridad en la industria química para abrirse paso

dentro de los planes de estudio pueden deberse al hecho de que la mayoría de los profesores de ingeniería química no tuvieron ocasión de abordar esas materias en su etapa como estudiantes. Otros problemas añadidos son que la investigación en este campo se circunscribe a un número muy limitado de centros, que se requiere trabajar con probabilidades y niveles de incertidumbre a menudo cuestionables y que los estudios son de naturaleza interdisciplinar, con inclusión frecuente de elementos de otras materias como biología, física de la atmósfera o derecho.

Sin embargo, no parece probable que las dificultades enumeradas puedan invertir la tendencia hacia una formación cada vez mayor de los ingenieros químicos, químicos industriales e ingenieros industriales en materias de análisis de riesgos y seguridad industrial. No sólo la necesidad de esta formación de reconoce ampliamente, sino que además estos profesionales son, por su conocimiento del proceso, de las condiciones de operación y de las técnicas y materiales involucrados, los únicos capaces de enfrentarse con éxito al problema global de la seguridad en una planta química.

Bibliografía

1. KLETZ, T.: *Hazop and Hazan. Identifying and Assessing Process Industry Hazards* (3.ª edición). The Institution of Chemical Engineers. Rugby (1992).
2. COMMITTEE ON CHEMICAL ENGINEERING FRONTIERS, NATIONAL RESEARCH COUNCIL: *Frontiers in Chemical Engineering. Research Needs and Opportunities*. National Academic Press. Washington (1988).
3. COMITÉ DE QUÍMICA DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS: «Ciencia y Tecnología Químicas: Necesidades Europeas para los años 90». *Hoja informativa de la RSEQ*. Junio, 1990.
4. NATIONAL SAFETY COUNCIL: *Accident Facts*. National Safety Council. Chicago (1985).
5. RODELLAR LISA, A.: *Seguridad e higiene en el trabajo*. Marcombo-Boixareu. Barcelona (1988).
6. CCPS (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY): *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE. Nueva York (1989).
7. DOW CHEMICAL COMPANY: *Chem. Eng. Prog.*, 86 (3), 21 (1990).
8. CROWL D. A., y LOUVAR, J. F.: *Chem. Eng. Educ.*, 22 (2), 74 (1988).
9. AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS: «AIChE Code of Ethics», en *Guide to AIChE, a handbook of AIChE members*. AIChE. Nueva York (1987).