

Seguridad inherente: rutas de síntesis y diseño de procesos

Inherent safety: synthesis routes and process design
Sécurité intrinsèque: voies de synthèse et conception des procédés

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad
e Higiene en el Trabajo (INSHT)

Elaborado por:

José Joaquín Seral Millán
ASPY PREVENCIÓN S.L.U.

Enrique Gadea Carrera

CENTRO NACIONAL DE
CONDICIONES DE TRABAJO (INSHT)

Esta Nota Técnica de Prevención es la primera de una serie sobre la utilización de metodologías para la evaluación de la seguridad inherente o intrínseca de procesos o rutas de síntesis química en las etapas de diseño de plantas químicas. Se trata de herramientas que, por una parte, facilitan un criterio o una orientación para la selección de aquellos procesos de síntesis que representan un menor nivel de riesgo y que, por otra parte, también permiten focalizar la atención sobre aquellos elementos del proceso seleccionado que presentan mayor nivel de riesgo. Se describe su concepto, alcance y ventajas e inconvenientes y se mencionan varias metodologías publicadas.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. OBJETIVO

La NTP 934 describe una metodología cualitativa y simplificada para la evaluación del riesgo de *accidente convencional* por agentes químicos peligrosos. Esta metodología tiene en cuenta la peligrosidad de los agentes químicos y las deficiencias existentes en las instalaciones, equipos, procesos y tareas con el objetivo de evaluar el nivel de riesgo y, en base a éste, jerarquizar racionalmente la prioridad de corrección de los factores de riesgo detectados.

Para la evaluación de los riesgos de los denominados *accidentes mayores* o la estimación de sus consecuencias, se utilizan otras metodologías, como por ejemplo el método Hazop (NTP 238), el índice Dow de Incendio y Explosión (NTP 334 y NTP 766) y la metodología Probit (NTP 291).

Sin embargo, cuando lo que se desea es disponer de un criterio para escoger el proceso más seguro entre distintas posibilidades (por ejemplo, las expuestas en la tabla 1 para la obtención de ácido acético), las mencionadas metodologías no son suficientemente útiles.

2. SEGURIDAD INHERENTE O INTRÍNSECA

Los principios en los que se basa la *seguridad inherente* o *intrínseca* fueron concebidos a finales de los años 70 y comienzos de los años 80 del siglo pasado por T. A. Kletz, a raíz del análisis de las causas y factores que produjeron la explosión de Flixborough en 1974. Kletz propugnó los principios de la seguridad inherente como el punto de partida del diseño de plantas de proceso y realizó importantes contribuciones a la seguridad en la industria química, así como una intensa labor divulgadora que se tradujo en numerosas publicaciones.

La Real Academia Española de la Lengua define *inherente* como aquello “que por su naturaleza está de tal manera unido a algo que no se puede separar de ello”. Un proceso químico es *inherentemente más seguro* si elimina o reduce riesgos y esta circunstancia es parte inseparable de la tecnología del proceso. La seguridad inherente o intrínseca, por tanto, está basada en las propiedades físicas y químicas del proceso, a diferencia de la *seguridad añadida* o *extrínseca* que depende de los sistemas de control y de alarma instalados, de los

RUTA 1: Carbonilación del metanol a baja presión.

Metanol + Monóxido de carbono → Ácido acético.

Temperatura: 150 – 200 °C. Presión: 4 – 15 atm. Catalizador de Rodio. Rendimiento: 99 %. Calor de reacción: $\Delta H_r = -1532$ J/g

RUTA 2: Oxidación de etileno.

Etileno + Oxígeno → Ácido acético.

Temperatura: 150 °C. Presión: 4,5 atm. Catalizador: Pd y H₃PO₄. Rendimiento: 80 %. Calor de reacción: $\Delta H_r = -6374$ J/g

RUTA 3: Oxidación de etanol.

Etanol + Oxígeno → Ácido acético + Agua.

Temperatura: 60 – 115 °C. Presión: 1 – 4 atm. Catalizador: acetato de cobalto. Rendimiento: 90 %. $\Delta H_r = -7593$ J/g

Tabla 1. Detalles de tres rutas distintas para la síntesis de ácido acético (adaptado de Palaniappan, 2004).

procedimientos operativos, de los equipos de protección individual, de la intervención humana, de la implantación de planes de emergencia o de autoprotección.

Un diseño *inherentemente más seguro*, según A.M. Heikkila, es aquel en el que se evitan los riesgos en vez de controlarlos Siguiendo el principio preventivo de eliminar los riesgos en primer lugar y si no es posible, reducirlos al máximo, se trata de lograr procesos con el nivel de riesgo más bajo posible. Si se puede eliminar el uso de sustancias o procesos peligrosos, esto se antepone a la capacidad de controlarlos con la tecnología adecuada de la que la industria química es capaz.

La aproximación tradicional a los problemas de seguridad en la industria química se basaba en tratar de reducir el riesgo a un nivel muy bajo dotando al sistema o proceso de suficientes *capas de protección* altamente fiables, como muestra la figura 1. Es decir, se fundamentaba en la seguridad añadida o extrínseca. Sin embargo, el riesgo del proceso básico siempre permanecería (por ejemplo, un aumento incontrolado de la temperatura de un reactor que pudiera dar lugar a una reacción *runaway*) y siempre existiría la posibilidad de que fallaran a la vez todas las capas de protección. Según refleja la figura 1, cuando una o varias de las capas de protección fallan, el nivel de riesgo no se reduce lo suficiente. Además, esta estrategia tiene la desventaja de que los costes de instalación y mantenimiento de las capas de protección pueden ser elevados.

Aplicando la seguridad inherente se puede alcanzar un nivel de seguridad adecuado sin tener que emplear las llamadas capas de protección, o reduciéndolas de manera considerable. Las cuatro estrategias principales de la seguridad inherente son: sustituir las sustancias químicas peligrosas por otras que entrañen poco o ningún peligro, minimizar las cantidades presentes de ellas, moderar o atenuar las condiciones de operación del proceso y, como consecuencia, simplificar el proceso, reduciendo la posible incidencia de errores humanos.

La *intensificación de procesos*, que hace referencia a tecnologías que permiten reemplazar procesos o equipos grandes, caros y que consumen mucha energía por otros de menor tamaño, más baratos y eficientes, se engloba dentro la estrategia de minimización. Un ejemplo ilustrativo de intensificación de procesos es el uso de reactores de membrana, que permiten aunar separación y reacción en un mismo proceso. En algunas aplicaciones la membrana sirve para proporcionar una alimentación contro-

lada de un reactivo dado, mejorando así su distribución, como en el caso de la oxidación selectiva de hidrocarburos en fase gas, en el que la alimentación gradual de oxígeno a través de una membrana reduce la formación de puntos calientes y limita la probabilidad de la pérdida de control de la reacción, ya que se trata de reacciones muy exotérmicas.

La seguridad inherente es, por tanto, un enfoque *proactivo o a priori* de la gestión del riesgo, a diferencia del enfoque *reactivo o a posteriori* que representa la seguridad añadida o extrínseca, aunque ambas son complementarias y deben coexistir ya que siempre se requerirán algunas medidas de control (capas de protección) de los riesgos que no hayan podido evitarse. Esto hace interesante apostar por evaluar la seguridad de la planta en todas las etapas de su proyecto y en todas las etapas de su ciclo de vida.

3. SELECCIÓN DE RUTAS DE SÍNTESIS QUÍMICA Y DISEÑO DE PROCESOS INHERENTEMENTE MÁS SEGUROS

Una *ruta de síntesis química* se puede definir como la/s materia/s prima/s y la secuencia de etapas de reacción que los convierte en el/los producto/s deseado/s (Lawrence, 1996). Por lo tanto, la selección de una ruta de síntesis concreta determina las sustancias químicas que estarán o pueden estar presentes en la planta y las condiciones de operación del proceso, así como puede condicionar los equipos necesarios para llevarla a cabo. Por extensión, también los riesgos a los que pueden verse expuestos los trabajadores y el entorno se verán supeditados a esta elección que influirá, en gran medida, en la severidad de las consecuencias que puedan tener lugar como resultado de la materialización de los factores de riesgo existentes. Como conclusión, la seguridad inherente está íntimamente vinculada a la ruta de síntesis y al proceso que se seleccione para la planta química; es por ello que se hace necesario disponer de un criterio que permita comparar entre sí las diferentes alternativas.

Los criterios económicos y los aspectos puramente técnicos del proyecto han sido, históricamente, los de mayor peso a la hora de que una empresa seleccionase el proceso para el diseño de una planta. Sin embargo, cada vez con más frecuencia, se tienen en cuenta los aspectos relativos a la seguridad y la salud, lo cual no sólo se debe a los propios imperativos legales sino también a cuestiones económicas, ya que una planta insegura termina por no resultar rentable. Aunque los beneficios que aporta la seguridad inherente son evidentes y claros, existen obstáculos a su implantación básicamente relacionados con la dificultad de realizar modificaciones en plantas ya existentes, la posible introducción de nuevos riesgos y, por último pero no por ello menos importante, la complejidad de cambiar la forma de pensar de las personas que toman las decisiones en las empresas. Cabe señalar que legislación SEVESO III, las reglamentaciones como EMAS (Eco-Management and Audit Scheme), normas como ISO 14000 y los principios de la denominada «Química Verde» (*Green Chemistry*), conducen a que la tendencia de las empresas sea a integrar la prevención de riesgos laborales, la sostenibilidad medioambiental y la responsabilidad social corporativa, por lo que cada vez en mayor medida se usa el término *Inherent SHE* (Inherent Safety, Health and Environment: Seguridad, Salud y Medioambiente Inherentes) para hacer referencia al compromiso de la empresa en la apuesta por crear sinergias que permitan alcanzar un equilibrio en los aspectos inherentes de todas ellas.

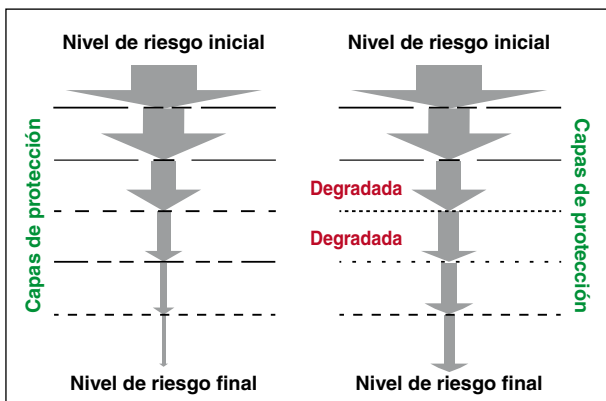


Figura 1. Seguridad añadida o extrínseca: uso de capas de protección para reducir el nivel de riesgo, el cual es representado mediante el grosor de las flechas (mayor grosor de la flecha implica mayor nivel de riesgo). (Fuente: adaptado de Hendershot, 1997).

En las primeras etapas de un proyecto (investigación y desarrollo, diseño conceptual) es cuando se lleva a cabo la selección de la ruta de síntesis química y la tecnología del proceso que se emplearán para fabricar el producto deseado. Y es precisamente en dicho momento cuando se tienen las mayores oportunidades para incorporar los principios de seguridad inherente y realizar aquellos cambios en el proyecto en este sentido, ya que conforme el proyecto va avanzando en sus sucesivas etapas las posibilidades de implementarlos van disminuyendo e incluso pueden resultar imposibles, tal y como se muestra en la figura 2.

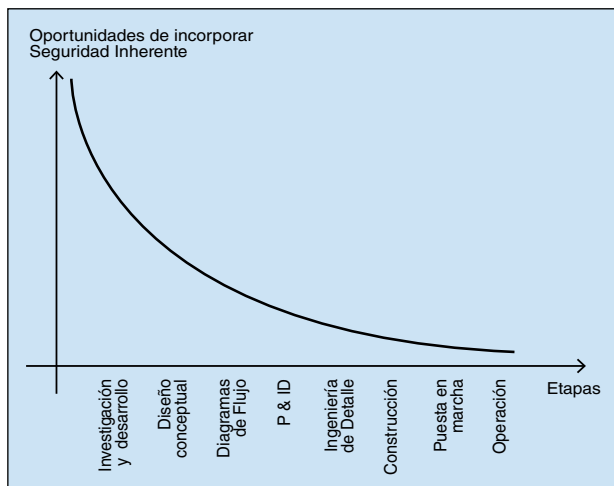


Figura 2. Oportunidades de incorporar seguridad inherente en las diferentes etapas del proyecto.

(Fuente: adaptado de Heikkilä, 1999).

El reto al que se enfrentan las empresas y los preventivistas es, por tanto, cómo evaluar la seguridad inherente de las diferentes alternativas durante esas primeras etapas del proyecto, en las cuales precisamente se cuenta con información limitada; en muchas ocasiones, incluso puede suceder que los únicos datos de que se dispone son los correspondientes a la propia reacción/es química/s en sí. Cuando el proyecto se encuentra en la fase de ingeniería de detalle, se dispondrá de toda la información, pero llegados a esta etapa es probable que la capacidad de maniobra para introducir cambios conceptuales que permitan aplicar los principios de seguridad inherente sea ya escasa, lo que se acaba traduciendo en incorporar seguridad extrínseca para controlar los riesgos al no haber podido eliminarlos o reducirlos lo suficiente. Estos inconvenientes hacen necesario disponer de metodologías que permitan evaluar la seguridad inherente en las primeras etapas del proyecto para permitir incorporarla y adoptarla en ellas y no cuando sea demasiado tarde. En definitiva, se precisan metodologías que permitan evaluar si nuestra elección es acorde a los principios de la seguridad y valorar la influencia que tienen en la seguridad inherente del proceso los cambios que se introduzcan o se piensen introducir.

4. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD INHERENTE

Dado que, como se ha dicho, en las primeras etapas del proyecto la información disponible es limitada, la mayoría de las metodologías se basan en *índices de riesgo* (*índices de seguridad inherente*), para cuyo cálculo se re-

quieran solamente datos que puedan obtenerse de forma más o menos sencilla. A través de estos índices puede establecerse una clasificación (en definitiva, un *ranking*) de las diferentes alternativas disponibles de rutas de síntesis química o de diseño del proceso, con el objetivo de compararlas entre sí y facilitar la selección de aquella que sea inherentemente más segura. Asimismo, algunos de estos índices pueden ser utilizados para evaluar, una vez escogida una alternativa, qué partes del proceso de la misma son más inseguras o presentan mayor nivel de riesgo, con el fin de focalizar y priorizar la atención sobre ellas. Otras metodologías expresan el resultado final de los índices no mediante un simple valor numérico, sino representándolo de una forma gráfica para que, a continuación, se realice una evaluación del resultado por parte del preventivista en base a la información objetiva de los gráficos y su experiencia y conocimientos.

Todos los procesos químicos tienen un número determinado de peligros asociados a ellos: como alta toxicidad de las sustancias, gran energía liberada en la reacción química, o temperaturas y presiones de operación elevadas. El problema es cómo minimizar simultáneamente los riesgos asociados con todos los peligros del proceso, ya que puede ocurrir que al realizar una modificación o elegir un diseño que reduzca el riesgo asociado a uno de los peligros, paralelamente se incremente el riesgo de otro, debido a que en muchas ocasiones no son propiamente independientes. Esta paradoja provoca que, en ocasiones, no esté clara cuál de entre varias alternativas es la inherentemente más segura. En un análisis más amplio y en otros términos, incluso introducir una modificación que permitiese mejorar la seguridad podría al mismo tiempo afectar negativamente a los aspectos medioambientales del proceso. Las ventajas y los inconvenientes de cada opción y de cada modificación que se haga en el diseño del proceso o en la selección de las rutas de síntesis deben, por lo tanto, poder ser evaluadas y comparadas.

No obstante, en la línea de lo comentado anteriormente, no existe una respuesta general ni única a la cuestión de qué ruta/proceso/diseño es inherentemente más seguro, ya que puede suceder que dos opciones presenten exactamente el mismo valor de *índice de riesgo* pero mientras que una es inherentemente más segura que la otra respecto a determinados riesgos porque, por ejemplo, la toxicidad de las sustancias químicas empleadas es menor, la otra sea inherentemente más segura respecto a otros riesgos porque, por ejemplo, se trabaja a menor presión. Puesto que ambas, como se indica, presentan exactamente el mismo valor de índice de riesgo, pero éste es debido a circunstancias diferentes (mayor presión frente a mayor toxicidad), las estrategias a seguir para eliminar o reducir los riesgos (es decir, las estrategias de principios de seguridad inherente) serán distintas en cada caso (*sustituir* las sustancias químicas por otras menos tóxicas en un caso, o *moderar o atenuar* las condiciones de operación reduciendo la presión, en el otro). En conclusión, para reducir el riesgo puede ser necesario actuar de diferente forma y enfocar las soluciones de manera singular.

Además, existe otra circunstancia a tener en cuenta, que es el hecho de que las metodologías desarrolladas para la evaluación de la seguridad inherente son difíciles de comparar entre sí. En primer lugar, porque de unas a otras pueden variar los parámetros que se tienen en consideración; por ejemplo, en algunas se considera como un parámetro el rendimiento de la reacción química y en otras no se utiliza. En segundo lugar, porque aunque dos metodologías diferentes utilicen en su proceso de eva-

luación un mismo parámetro (por ejemplo, la temperatura) la ponderación o asignación de valores para puntuar esa variable puede diferir según el criterio en el que se basa el autor de la metodología; también sucede que metodologías distintas utilizan el mismo parámetro pero lo definen en términos diferentes (por ejemplo, algunas de ellas consideran que la *explosividad* debe ser valorada en términos de la diferencia entre el Límite Superior de Explosividad y el Límite Inferior de Explosividad, es decir, LSE - LIE, mientras que otras metodologías consideran que solamente debe tenerse en cuenta en la valoración de la explosividad el Límite Inferior de Explosividad, LIE). Finalmente, porque la forma que tiene cada metodología de expresar los resultados puede ser también distinta (la mayoría de autores expresan el resultado como un índice, es decir, como un valor numérico, pero otros lo hacen de forma gráfica). Esto da lugar a que, cuando se utilizan varias de estas metodologías para evaluar un mismo conjunto de rutas o procesos de síntesis química, el resultado (el *ranking* o clasificación) pueda no ser coincidente. Por todo ello, los resultados siempre deben ser estudiados, interpretados y valorados con juicio y con extremo cuidado por parte del prevencionista.

A continuación se relacionan, por orden cronológico, algunas de las metodologías y herramientas más destacadas relativas a la evaluación de la seguridad inherente desarrolladas en las últimas décadas:

Prototype Index of Inherent Safety (PIIS)

Es el trabajo pionero de D.W. Edwards y D. Lawrence que está enfocado al análisis de la selección de la ruta de síntesis química inherentemente más segura para la obtención de un producto deseado. Se centra en la seguridad de las reacciones químicas pero no considera apropiadamente otros factores que intervienen en el proceso (reacciones no deseadas o equipos empleados para el proceso). El índice total (resultado) es un valor numérico que se obtiene a partir de la suma de dos índices: uno vinculado a las sustancias químicas intervinientes en las reacciones químicas, *Chemical Score*, que valora cuatro parámetros: inflamabilidad, explosividad, toxicidad e inventario, y otro vinculado a las condiciones de operación en las que el proceso tiene lugar, *Process Score*, que valora tres parámetros: temperatura, presión y rendimiento. Las puntuaciones que asigna el método a cada uno de los parámetros han sido elaboradas asignando valores numéricos por intervalos. Cuanto mayor es el valor numérico obtenido como resultado (*Total Score*), más insegura es la ruta de síntesis, por lo que el método permite comparar varias alternativas de ruta de síntesis entre sí disponiendo de un criterio para seleccionar aquella que resulte inherentemente más segura.

The INSET Toolkit (INherent SHE Evaluation Tool)

Herramienta desarrollada dentro del proyecto europeo INSIDE (INherent SHE In DEsign) para identificar, evaluar, optimizar y seleccionar opciones de diseño inherentemente más seguras. El Proyecto INSIDE se creó en 1994 con el objetivo de reunir a la industria y a los investigadores en el campo de la seguridad inherente para desarrollar formas prácticas de fomentar su uso en el desarrollo de procesos y en el diseño de las plantas. *The INSET Toolkit* tiene dos funciones: por una parte, es un método para aumentar la concienciación de las personas involucradas tanto en la selección del proceso por el cual un producto químico deseado se produce, como en el diseño de

las plantas de producción; y por otra parte, es una guía práctica para ser utilizada por estas personas como parte integral del desarrollo, el diseño y los procesos de toma de decisiones. Puede ser utilizada tanto para el diseño de plantas nuevas como para modificaciones en plantas ya existentes, concentrando su acción en las primeras etapas que es donde se toman casi todas las principales decisiones. INSET cubre cuatro etapas: selección de la ruta de síntesis química, evaluación detallada de la ruta de síntesis, optimización del diseño del proceso y diseño de la planta de proceso.

Inherent Safety Index (ISI)

El índice ISI, de A.-M. Heikkilä (1999), permite evaluar la seguridad inherente en las etapas de diseño conceptual de una planta de proceso. Al igual que en el caso del índice PIIS, el índice total es un valor numérico que se obtiene a partir de la suma de dos índices: *Chemical inherent safety index*, que valora 7 factores (calor de reacción de las reacciones principal y paralelas, inflamabilidad, explosividad, toxicidad, corrosión e interacción química) y *Process inherent safety index* que valora 5 factores (inventario, temperatura, presión, seguridad de los equipos y seguridad de la estructura del proceso). Al igual que en el índice PIIS, las puntuaciones que asigna el método a cada uno de los factores son por intervalos y, en cuanto al resultado final, cuanto mayor es el valor del índice obtenido más inseguro es el proceso. En este caso, y a diferencia del índice PIIS, el índice de riesgo ISI sí que tiene en cuenta aspectos del proceso más allá de las propias reacciones químicas, lo que lo convierte en una herramienta útil para clasificar las diferentes alternativas posibles de diseño del proceso, proporcionando un criterio para la selección de aquella inherentemente más segura. El índice ISI puede también aplicarse a un único proceso, dividiendo éste en partes, lo que permite focalizar la atención sobre aquellos elementos del proceso seleccionado que presentan mayor nivel de riesgo. En la tabla 2 se muestra la relación existente entre los parámetros del índice ISI y los principios de la seguridad inherente.

Principios de Seguridad Inherente	Parámetros del índice ISI (Heikkilä, 1999)
Minimizar.	<ul style="list-style-type: none"> • Inventario.
Sustituir (sustancias no peligrosas o sustancias menos peligrosas).	<ul style="list-style-type: none"> • Inflamabilidad. • Explosividad. • Toxicidad. • Interacción química. • Corrosión.
Moderar o atenuar.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. • Presión. • Calor de reacción. • Interacción química.
Simplificar.	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad de los equipos. • Seguridad de la estructura del proceso.

Tabla 2. Relación o conexión entre los principios de seguridad inherente y los parámetros del índice ISI (Fuente: adaptada de Heikkilä, 1999).

Metodología *iSafe*

La metodología *iSafe* de C. Palaniappan (2004) para el análisis de la seguridad inherente en las etapas de diseño está centrada en la selección de la ruta de síntesis inherentemente más segura y la información que utiliza como base de partida requiere el conocimiento de ocho parámetros: cuatro relativos a las sustancias que intervienen en las reacciones químicas (toxicidad, inflamabilidad, explosividad y reactividad) y otros cuatro relativos a las reacciones químicas de la ruta de síntesis (temperatura, presión, rendimiento de la reacción y calor de reacción). Para valorar el rendimiento de la reacción utiliza las puntuaciones del índice PIIS de Edwards y Lawrence; para valorar la reactividad de las sustancias químicas utiliza el criterio de la NFPA (*National Fire Protection Association*); para el resto de parámetros, utiliza las puntuaciones del índice ISI. A partir de estos parámetros, utilizando la metodología se obtiene un conjunto de índices de riesgo, cada uno de los cuáles pone énfasis en aspectos concretos y que permiten, por una parte, identificar para cada ruta de síntesis qué aspectos relativos a la seguridad son más importantes o prioritarios para luego centrar las alternativas de diseño en ellos y, por otra parte, valorar qué rutas de síntesis son inherentemente más seguras (*ranking*). Para cada uno de los índices, el resultado se expresa mediante un valor numérico y, al igual que en otras metodologías, un valor numérico más alto equivale a mayor nivel de riesgo.

Método gráfico de J.P. Gupta y D.W. Edwards (2003)

En esta metodología, que parte del índice PIIS, los autores realizan una propuesta para evaluar la seguridad inherente donde los parámetros escogidos se representan de forma gráfica. Su método, al igual que el índice PIIS, está muy dirigido a la selección de las rutas de síntesis química inherentemente más seguras, por lo que deja sin valorar otros aspectos del proceso. Únicamente emplea tres parámetros: presión, temperatura y FET. El parámetro FET, que es adimensional, engloba, a su vez, a tres variables (inflamabilidad, explosividad y toxicidad). Los tres parámetros son representados gráficamente de manera individual y para cada una de las etapas de cada una de las rutas de síntesis. Una vez se dispone de la representación gráfica completa de todas las alternativas, es decir, de todas las rutas de síntesis, corresponde al

prevencionista realizar la evaluación de la seguridad inherente, teniendo en cuenta que valores numéricos más altos de los parámetros indican mayor nivel de riesgo.

M. Gentile (2004)

Esta metodología introduce como novedad, respecto a las anteriores, el uso de la lógica difusa para la medición de la seguridad inherente. El empleo de la lógica difusa es útil para combinar los datos cuantitativos con información cualitativa. Además, la lógica difusa ayuda a modelar la incertidumbre y subjetividades implícitas en la evaluación de ciertas variables o parámetros, inconveniente éste, el de la subjetividad, que ha sido considerado por diversos expertos de la seguridad inherente como un defecto de algunas metodologías debido a que asignan las puntuaciones de los parámetros "por intervalos", lo que provoca que el "salto de puntuación" de un intervalo al siguiente sea brusco, además del hecho de que el valor de las puntuaciones y el tamaño de los intervalos dependen del criterio del autor de la metodología correspondiente; mediante el uso de la lógica difusa se abordan estos problemas. El método está enfocado a la utilización de ordenador con el propósito de vincularlo y orientarlo a la simulación del proceso.

5. CONCLUSIONES FINALES

La seguridad en las plantas químicas es un proceso integral que engloba tanto a la seguridad inherente como a las medidas de prevención, las medidas de protección y las medidas enfocadas a la limitación de los efectos cuando el daño se materialice. La aproximación debe ser en ese orden, de conformidad con los principios de la acción preventiva que expone el artículo 15 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995). Apostando por la seguridad inherente en primer término, se consigue eliminar y reducir riesgos, combatiéndolos en su origen, teniendo en cuenta la evolución de la técnica y sustituyendo lo peligroso por lo que entraña poco o ningún peligro. Aplicar los principios de la seguridad inherente en las etapas iniciales del proyecto de una planta de proceso permite elegir materiales y sustancias menos peligrosas, condiciones de operación del proceso más moderadas y tecnologías más seguras, simples y eficientes, a la vez que más respetuosas con el medioambiente.

BIBLIOGRAFÍA

AMYOTTE, P.R.; KHAN, F.I.; KLETZ, T.A.

Inherently safer design activities over the past decade.

Hazards XXI, IChemE Symposium Series, 2009, No. 155, 736-743. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: https://www.icheme.org/-/media/Documents/Subject%20Groups/Safety_Loss_Prevention/Hazards%20Archive/XXI/XXI-Paper-106.pdf.

CORONAS, J.; MENÉNDEZ, M.; SANTAMARÍA, J.

The porous-wall ceramic membrane reactor: an inherently safer contacting device for gas-phase oxidation of hydrocarbons

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 8, 97-101, 1995.

GENTILE, M.

Development of a hierarchical fuzzy model for the evaluation of inherent safety.

College Station: Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2004. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/1277/etd-tamu-2004B-CHEN-Gentile-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

GUPTA, J.P.; EDWARDS, D.W.

A simple graphical method for measuring inherent safety

Journal of Hazardous Materials. 104, 15-30, 2003.

HEIKKILÄ, A.M.

Inherent Safety in Process Plant Design. An Index-Based Approach.

Espoo: D. Tech. Thesis, VTT Publications 384, Technical Research Centre of Finland, 1999. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P384.pdf>

HENDERSHOT, D.C.

Safety Through Design in the Chemical Process Industry: Inherently Safer Process Design.

Benchmarks for World Class Safety Through Design Symposium. Bloomington; 1997. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.197.5636&rep=rep1&type=pdf>

LAWRENCE, D.

Quantifying inherent safety of chemical process routes

Loughborough: Submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of Degree of Doctor of Philosophy of the Loughborough University of Technology, 1996. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/7427/3/16403.pdf>

MANSFIELD, D.; CLARK, J; MALMÉN, Y.; SCHABEL, J.; ROGERS, R.; SUOKAS, E.; TURNEY, R.; ELLIS, G.; VAN STEEN, J.; VERWOERD, M.

Integrated version. The INSET Toolkit. INherent SHE Evaluation Tool.

AEA Technology, Eutech Engineering Solutions, INBUREX, Kemira Agro, TNO, VTT Manufacturing Technology, 2001. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: https://www.icheme.org/~media/Documents/Subject%20Groups/Safety_Loss_Prevention/INSET_Toolkit.pdf

PALANIAPPAN, C.; SRINIVASAN, R.; TAN, R.

Selection of inherently safer process routes: a case study.

Chemical Engineering and Processing. 2004, Vol. 43, 647-653. [Consulta: 18 de diciembre de 2015].

Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.566.3150&rep=rep1&type=pdf>

SANTAMARÍA, J.M.; HERGUIDO, J.; MENÉNDEZ, M.A. Y MONZÓN, A.

1ª ed. Ingeniería de reactores.

Madrid: Editorial Síntesis, 1999.