



## LA SEGURIDAD EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Carlos Eduardo Guzmán Martínez, Claudia Gutiérrez Antonio\*, Sergio Iván Martínez Guido, Oscar Daniel Lara Montaña

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Blvd. Villas del Mesón S/N, Juriquilla, Querétaro, Querétaro, 76230, MEXICO. [claudia.gutierrez@uaq.mx](mailto:claudia.gutierrez@uaq.mx)

### Resumen

En el sector industrial existen distintos factores que ponen en riesgo la seguridad de los trabajadores, el patrimonio de las empresas, e incluso la integridad de comunidades enteras. Por ello, es de vital importancia conocer qué es la seguridad industrial, qué riesgos existen en el lugar de trabajo; de igual manera saber si existe una eventualidad, cuál es el protocolo que debe seguirse, y cuáles son las consecuencias en caso de que ésta suceda. Para resolver todas estas preguntas, existe una metodología llamada evaluación de riesgos. Así, en la presente redacción se muestran algunas generalidades del proceso de evaluación, así como algunos hechos históricos que impactaron en la percepción de la seguridad industrial.

*Palabras clave:* evaluación de riesgos; ingeniería de procesos; seguridad inherente.

## SAFETY IN INDUSTRIAL PROCESS

### Abstract

In the industrial sector there are different factors that put at risk the safety of workers, the assets of companies, and even the integrity of entire communities. Therefore, it is so important to know what industrial safety is, and what kind of risks exist in the workplace. Indeed, if there is an eventuality, what is the protocol and what are the consequences if there is an eventuality. To resolve all these questions, there is a methodology called risk assessment. In this writing, some generalities of the evaluation process and some historical facts that impacted the perception of industrial safety are shown.

*Keywords:* risk assessment; process engineering; inherent safety.



## 1. Introducción

La ingeniería de procesos nace con la finalidad de cubrir las distintas necesidades del ser humano. Éstas se pueden generalizar en productos y servicios en los ámbitos de alimentos, vivienda, transporte, salud, recreación, vestido, entre otras.

El fundamento de la ingeniería de procesos se centra en el diseño, simulación, optimización y control de las operaciones a través de las cuales se transforman los recursos naturales en los bienes; estos productos ayudan a mejorar la calidad de vida humana, sumando siempre al desarrollo sostenible. Desafortunadamente, la industria de la transformación siempre implica riesgos, físicos o químicos, a la integridad humana. Los riesgos físicos están relacionados con las condiciones de operación, por ejemplo, presión, temperatura, fallas mecánicas. Los riesgos químicos son parte de la naturaleza de los insumos, así como productos intermediarios y finales. En ellos se incluyen explosiones, liberación de energía proveniente de las reacciones exotérmicas, corrosiones, toxicidad e incendios.

Algunas condiciones pueden aumentar el riesgo a lo largo de un proceso de transformación; por ejemplo, el cambio en las propiedades de las sustancias o mezclas debido a la variación de los parámetros de proceso (presión y temperatura). Estas condiciones pueden causar un nivel elevado de riesgo o generar reacciones secundarias peligrosas. Por otro lado, se pueden tener

condiciones en las que se pierde el contenido en los tanques (fugas) y el material de proceso entra en contacto con corrientes de servicio o componentes ambientales, y, con ello, generar una situación de riesgo.

Para ejemplificar un poco la magnitud del tema existen 4 casos desastrosos que ocasionaron un gran impacto en la ingeniería de procesos. Éstos son Pasadena en Estados Unidos, Flixborough en Inglaterra, Seveso en Italia (Walter y col., 1985), así como Bhopal en India (Ronald y col., 2007).

En octubre de 1989, al interior de una empresa dedicada la producción de polietileno de alta densidad, en Pasadena-Estados Unidos, sucedió una explosión derivada de la fuga de 31.72 toneladas de una mezcla altamente inflamable; esta mezcla contenía etileno, isobutano, hexano e hidrógeno. Como resultado del evento, lamentablemente 23 personas perdieron la vida y 314 quedaron lesionadas. Se calcula que los daños económicos oscilaron en más de \$715 millones de dólares de aquella época. La fuga del material formó una gran nube de gas tóxico e inflamable de manera instantánea; lo anterior debido a que el sistema se encontraba a presión y temperaturas elevadas. La nube se incendió dos minutos después de la liberación por alguna fuente de ignición. En este accidente, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) encontró distintos errores, entre los más importantes



destacan los siguientes: a) no existían detectores de combustible gaseoso, ni alarmas; b) no se había realizado un análisis de riesgos en la planta, por lo tanto, existían deficiencias severas en la seguridad las cuales fueron ignoradas (Robert y col., 1994).

En junio de 1974, en una empresa se producía un insumo para la industria del nylon (70,000 toneladas de caprolactama/año) en Flixborough-Inglaterra. El proceso utiliza ciclohexano, el cual tiene propiedades muy similares a la gasolina, bajo condiciones de proceso delicadas (155 °C y 7.9 atmósferas). A esta presión y temperatura, si el ciclohexano se despresuriza a condiciones atmosféricas, inmediatamente se volatiliza. Como antecedente al accidente, el proceso por donde circula el ciclohexano consta de 6 reactores conectados en serie; varios meses antes del accidente, se había reportado que el reactor #5 se encontraba dañado. Por lo tanto, los ingenieros de proceso decidieron retirarlo para su reparación; sin embargo, como esta actividad llevaría tiempo y no querían detener la producción, decidieron conectar el reactor #4 al #6, y recircular el excedente de ciclohexano. Hasta este punto, no suena mal el plan de conectar los reactores #4 y #6; sin embargo, como la empresa no contaba con la tubería adecuada para hacer esa conexión, utilizaron fuelles flexibles. Dado el peso del flujo másico al interior del proceso, las condiciones de presión y temperatura, los fuelles se vencieron y se liberaron 30 toneladas de ciclohexano para

formar una enorme nube tóxica e inflamable; dicha nube se encendió aproximadamente 45 segundos después del acontecimiento. El resultado de la catástrofe fueron 28 personas fallecidas, 36 lesionadas, daños en 1,821 casas y pérdidas en 167 comercios. El fuego duró más de 10 días encendido (Trevor y col., 1994). El accidente en Flixborough pudo haberse prevenido si la línea de bypass (conexión entre el reactor #4 y #6) hubiera sido instalada con una supervisión adecuada por personal experimentado de ingeniería; no obstante, el accidente no habría sido tan grave si el inventario de componentes inflamables no hubiera sido tan grande: 330,000 galones de ciclohexano, 66,000 galones de nafta, 11,000 galones de tolueno, 26,400 galones de benceno, y 450 galones de gasolina. Como regla heurística, se debe almacenar lo mínimo posible de estos materiales en la planta.

Diversos accidentes industriales, como los antes mencionados, pueden ser descritos y analizados; sin embargo, independiente a la naturaleza del incidente, todos promueven la pregunta/reflexión: ¿Qué se puede hacer para evitar estos escenarios catastróficos? La respuesta es un análisis de seguridad que permita identificar y cuantificar los riesgos presentes para poder disminuirlos. En este contexto, la nueva interrogante que surge es: ¿Cómo se desarrollan los análisis de riesgo cualitativos y cuantitativos? La respuesta a esta pregunta incluye distintas metodologías, las cuales son abordadas en la siguiente sección.



## 2. Evaluación de riesgos

Una evaluación de riesgos tiene por objetivo identificar los eventos que pueden ocasionar un accidente, la probabilidad de que estos eventos ocurran y realizar un análisis de consecuencias. ¿Qué consecuencias existen? Bueno, éstas pueden ser lesiones, vidas perdidas, daño al medio ambiente, así como pérdida de equipo y de producción.

Toda evaluación inicia con la descripción del sistema. Un análisis de riesgos no es la excepción. Para ello, se debe contar con los diagramas de flujo de procesos, diagramas de instrumentación y control de procesos. Con estos elementos es factible visualizar todas las corrientes de materia que se tienen, balances de materia, temperaturas, presiones, alarmas, controladores, medidores, etc. Es imprescindible que este tipo de diagramas se encuentren actualizados y verificados en planta, de lo contrario no sirven ya que no están representando al proceso completo; por lo que desde ahí ya se tiene un riesgo elevado, dado que no se conoce el proceso.

El siguiente paso consta de la identificación del peligro. Para ello existen diversas metodologías, de las cuales no hay un dominio de alguna de ellas sobre todos los procesos; en la práctica, la selección de estas técnicas se basa en la experiencia del evaluador.

Algunas de las técnicas de identificación incluyen listas de control de riesgos, encuestas de riesgos,

análisis HAZOP (Hazards and Operability studies), revisión de seguridad. Es importante señalar que, para realizar esta etapa de identificación de riesgos se debe involucrar un equipo multidisciplinario; de esta manera, es factible identificar riesgos que uno u otro profesionista no vería debido a su formación académica. También es importante involucrar a los operadores en la identificación, debido a que ellos tienen el contacto más íntimo con el proceso (CCPS, 2011).

Una vez realizado el análisis cualitativo (identificación de riesgos) es de gran importancia poder cuantificar ese riesgo. Para lograr una ponderación es necesario calcular un índice de riesgo (IR); este índice es directamente proporcional al producto de la probabilidad de que el incidente ocurra y el impacto que este pueda tener, ecuación (1).

$$IR \propto (P)(Z) \quad (1)$$

IR= Índice de riesgo, P= probabilidad de que el incidente catastrófico ocurra, Z= impacto del incidente catastrófico.

Basados en la relación representada por la ecuación (1), un proceso se considera ideal cuando tanto la probabilidad como la consecuencia son bajas.

Para esquematizar el concepto del índice de riesgo, imagine: ¿cuál es la probabilidad de que una persona se caiga mientras camina con los cordones de los zapatos desamarrados? La



probabilidad es alta, pero ¿cuál es la consecuencia de ese evento?, Quizá una lesión muscular, por lo tanto, el índice de riesgo es bajo. Por otro lado, si se piensa en las estaciones de combustible vehicular a lo largo del planeta. Si se sigue la normativa internacional de seguridad, la probabilidad de que éstas exploten es muy baja; sin embargo, si explota, ¿cuál es su consecuencia? Pérdida de vidas (el cual se considera como el peor escenario, dado que la vida es el recurso más valioso del ser humano). A pesar de ello, el índice de riesgo continúa siendo bajo debido al aporte de la probabilidad (la cual es muy pequeña si se cumple con lo establecido).

Ahora bien, planteando una actividad ilegal, como el robo de combustible de los ductos de refinerías, tanto la probabilidad como la consecuencia son muy altas; por lo tanto, el índice de riesgo es muy elevado. El riesgo elevado se debe al uso de herramientas de uso doméstico, condiciones de operación inapropiadas (como altas presiones para la distribución del combustible) y, en la mayoría de los casos, poca o nula experiencia con el manejo de los materiales en cuestión. Como consecuencia, se obtienen explosiones e incendios que terminan en fatalidades.

¿Cómo se puede estimar la probabilidad? La probabilidad de que un componente del proceso (desde un instrumento o una operación unitaria completa) no falle durante un intervalo de tiempo (0,t) está dada por una distribución de Poisson,

ecuación (2) (Crowl y col., 2001), y se conoce como fiabilidad, “R”. El complemento de la fiabilidad se conoce como probabilidad de fallo, “p”, ecuación (3) (Crowl y col., 2001).

$$R(t) = e^{-\mu t} \quad (2)$$

$$p(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

R= fiabilidad,  $\mu$ =tasa de fallo (unidades de fallo/tiempo), t= tiempo, p= probabilidad de fallo.

En la siguiente subsección se describe a detalle la metodología para el análisis cuantitativo.

## 2.1 Metodología para análisis cuantitativo

El procedimiento para realizar el análisis cuantitativo de riesgos (QRA por sus siglas en inglés) consta de 5 etapas (Crowl y col., 2001), las cuales se describen a continuación:

- Definir la secuencia de eventos e incidentes potenciales.

Los eventos involucrados en esta etapa son la liberación total e instantánea de los componentes almacenados en un recipiente, y las fugas, las cuales constituyen una liberación parcial, por un orificio, durante un lapso de tiempo.

De manera similar a los eventos, los incidentes son caracterizados dependiendo del tipo de evento. Por ejemplo si el evento es una fuga, los incidentes pueden ser la formación de lanzallamas, piscinas de fuego o nubes



tóxicas; todo depende del estado de agregación de la materia. Por otro lado, si el evento es una liberación instantánea, los incidentes pueden ser explosiones, bolas de fuego o nubes tóxicas (CCPS, 2000).

- Evaluar las consecuencias del incidente. Esta etapa incluye el modelado matemático de dispersión, fuego y explosión. En este punto, se definen las zonas del terreno (áreas con centro en el origen del siniestro) que cuentan con concentraciones letales de energía térmica, sustancias tóxicas y sobrepresión (onda de choque derivada de una explosión).

Los modelos matemáticos utilizados para la descripción de los fenómenos de transporte consideran flujos másicos, presiones, velocidades de flujo, densidades, entalpías, entre otros (CCPS, 2000).

- Estimar la frecuencia del incidente utilizando árboles de eventos o árboles de fallo.

Para describir esta etapa es importante resaltar que cuando se produce un accidente en una planta, entran en juego diversos sistemas de seguridad para evitar que el accidente se propague. Estos sistemas pueden ser exitosos o fallar, lo

cual se puede definir con una probabilidad, ecuación (3).

Tanto los árboles de eventos como los árboles de fallo definen la frecuencia de la consecuencia del incidente  $i$  ( $f_i$ ), con la frecuencia del incidente  $i$  ( $F_i$ ), la probabilidad de la consecuencia del incidente  $i$  ( $p_{o,i}$ ), y con la probabilidad de la consecuencia dada la ocurrencia de un incidente precursor ( $p_{oc,i}$ ). Matemáticamente, éstos son descritos por la ecuación (4) (CCPS, 2000).

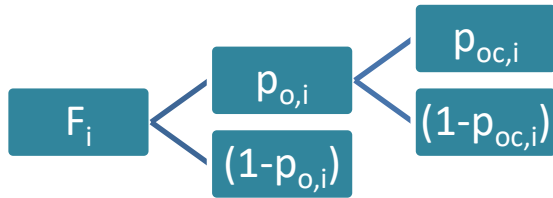
$$f_i = (F_i)(p_{o,i})(p_{oc,i}) \quad (4)$$

$f_i$ = frecuencia de la consecuencia del incidente  $i$ ,  $F_i$ = frecuencia del incidente  $i$ ,  $p_{o,i}$ = probabilidad de la consecuencia del incidente  $i$ ,  $p_{oc,i}$ = probabilidad de que la consecuencia dada la ocurrencia de un incidente precursor.

Gráficamente los árboles son representados por la Figura 1. Para ejemplificar cada concepto, se considera la explosión de un reactor. En este escenario,  $F_i$ = frecuencia de liberación instantánea del reactor,  $p_{o,i}$ = probabilidad de no tener una ignición inmediata,  $p_{oc,i}$ = probabilidad de no tener ignición,  $f_i$ = frecuencia de generación de una nube tóxica (consecuencia) debido a la



liberación instantánea de un reactor sin ignición.



**Figura 1.** Representación de un árbol de eventos.

Es importante señalar que los árboles de eventos comienzan con un evento inicial, y avanzan hacia el evento superior (inducción). Por otra parte, los árboles de fallas comienzan con un evento superior, y avanzan hacia atrás hasta el evento iniciador (deducción).

- Estimar el impacto del incidente sobre las personas, ambiente y propiedades.

En esta etapa se utiliza la función probit, la cual permite calcular la probabilidad de muerte. En estadística, la función probit es la inversa de una función de distribución, la cual no se abordará en este artículo.

Es imperativo resaltar que la probabilidad de muerte es muy distinta a las probabilidades antes mencionadas; las anteriores hacen referencia a la frecuencia de los incidentes y la

probabilidad de muerte describe la posibilidad del 50% que tiene una persona de sobrevivir al impacto del accidente; esto está en función de la concentración recibida de sustancias tóxicas, energía térmica o sobrepresión. Matemáticamente, ésta se describe con la ecuación (5) (CCPS, 2000). La ecuación (6) representa la definición de la función error (CCPS, 2000).

$$P_f = (0.5) \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{Y-5}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad (5)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} \quad (6)$$

$P_f$  = función probit con probabilidad del 50% de muerte,  $\operatorname{erf}$  = función error (definida por ecuación (6)),  $Y$  = variable probit.

La definición de la variable probit depende de la naturaleza de la exposición. Por ejemplo, para exposición a sustancias tóxicas se describe con la ecuación (7) (CCPS, 2000), para exposición al calor de radiación se utiliza la ecuación (8) (CCPS, 2000), y para efectos de presión por una explosión se tiene la ecuación (9) (CCPS, 2000).

$$Y = a + (b) \left( \ln \left( (C^n)(t) \right) \right) \quad (7)$$

$$Y = -36.38 + (2.56) \left( \ln \left( (Q^{4/3})(t) \right) \right) \quad (8)$$





$$Y = -77.1 + (6.91)(\ln(p^\circ)) \quad (9)$$

$Y$ = variable probit,  $a$ ,  $b$ ,  $n$  =constantes que describen la toxicidad de una sustancia,  $C$ = concentración del tóxico,  $t$ =tiempo de exposición,  $Q$ = calor de radiación,  $p^\circ$  =presión parcial.

La variable probit representa la relación existente entre las variables físicas del proceso con impacto negativo en la integridad del individuo (toxicidad de las sustancias, el calor por radiación y la presión parcial), las consecuencias del incidente (generalmente se utiliza la fatalidad, pero pueden ser lesiones o daños materiales), y la posición en el espacio del individuo al momento del evento.

- Estimar el índice de riesgo individual.

El cálculo de un índice de riesgo individual en una ubicación geográfica cerca de la planta se asume que las contribuciones de todos los casos de incidentes resultantes son aditivos. Esto quiere decir que el riesgo total individual en cada punto es igual a la suma de los riesgos individuales; en ese punto, para todos los incidentes resultantes asociados con la planta.

El índice de riesgo individual por incidente es representado por la ecuación

(10) (CCPS, 2000) y el índice de riesgo individual total por la ecuación (11) (CCPS, 2000).

$$IR_{x,y,i} = (f_i)(P_{f,i}) \quad (10)$$

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{i=n} IR_{x,y,i} \quad (11)$$

$IR_{x,y,i}$ = Índice de riesgo individual del incidente  $i$ ,  $f_i$ = frecuencia de la consecuencia del incidente  $i$ ,  $P_{f,i}$ = función probit con probabilidad del 50% de muerte del incidente  $i$ ,  $IR_{x,y}$ = Índice de riesgo total.

Para ejemplificar la definición de secuencia de eventos, se retoma el caso del accidente en Flixborough, Inglaterra. El evento principal sucede cuando los fuelles liberan el ciclohexano y éste se volatiliza; este evento se le considera el #1.”, No obstante, este incidente no fue el único que ocurrió, ya que también hubo un incendio provocado por la gran cantidad de sustancias almacenadas como benceno, nafta, gasolina, tolueno, entre otros. En el caso de Flixborough, el índice de riesgo es la sumatoria de los cálculos de ambos incidentes. Si hubiera más incidentes, todos deberían ser incluidos en la suma.

Para evaluar las consecuencias se deben incluir los modelos matemáticos que describen los escenarios de fuga mediante las velocidades de descarga, la cantidad total liberada (o el tiempo de duración de la fuga), evaporaciones provenientes de las charcas químicas (producto de los derrames), extensión de destellos (flash) y





formación de aerosoles. La duración de la fuga puede ser instantánea o continua (generando plumas).

Si se caracterizan los distintos tipos de resultados posibles derivados de una fuga se tienen explosiones de nube de vapor, incendios repentinos, explosiones físicas, explosiones de vapor líquido en ebullición, bolas de fuego, explosiones confinadas, fuego de piscina, fuego de chorro (parecido a un “lanzallamas”).

Aunque algunas de las consecuencias suenan muy similares, cada uno tiene su definición (Crowl y col., 2001), por ejemplo:

- Las explosiones físicas se originan cuando un recipiente que contiene gas a presión se rompe, y se libera la energía almacenada resultante. Esta energía produce una onda de choque y acelera los fragmentos de los tanques, de forma similar a las esquirlas de una granada o bomba. Si el contenido es inflamable es posible que la ignición del gas liberado tenga consecuencias adicionales.
- Para el caso de una explosión de vapor de expansión de líquido en ebullición, ésta ocurre cuando hay una pérdida repentina de contención de un recipiente a presión que contiene líquido sobrecalentado o gas licuado.
- Una bola de fuego se forma rápidamente debido a la rápida expulsión de material

inflamable, debido a la despresurización del recipiente.

En el caso del accidente de Flixborough se teoriza que los incidentes fueron, en un inicio, una fuga por parte los reactores conectados por el fuelle; después, una liberación instantánea por parte del resto de reactores. Estos incidentes generaron una nube de vapor tóxico, seguido por una bola de fuego.

Para estimar la frecuencia del incidente, como se mencionó anteriormente, se utilizan árboles de eventos y árboles de fallo. En el caso particular de Flixborough, la frecuencia del incidente se debe centrar en la tubería, no en el reactor. Esta acción se justifica porque ya se tenía el reporte de fuga en la tubería que conectaba al reactor #5 y #6, antes de colocar el fuelle que derivó en el accidente.

Una parte muy importante del análisis cuantitativo es el modelo del impacto, el cual depende del objetivo del estudio; por ejemplo, si se tiene interés en la salud humana, muertes, lesiones o bienes materiales. Incluso, es posible asociarse a los efectos ambientales, aunque pueden ser un poco más complejos de cuantificar; esto se debe a que pueden incluir distintas categorías como impacto en la vida animal o plantas, contaminación de suelo, daño a los recursos naturales, entre otros.

Los impactos en el caso Flixborough se encuentran ligados al calor de radiación y la



presión parcial derivada de la liberación instantánea al momento de la despresurización de los reactores.

En los análisis cuantitativos se consideran distintos tipos de incidentes que suceden de manera simultánea; por lo tanto, es necesario contar con una unidad de consecuencia común para poder agruparse en un solo índice. En otras palabras, no se pueden sumar personas lesionadas por quemaduras de primer grado + quemaduras de segundo grado + muertes + intoxicaciones; tiene que ser un solo concepto todo.

Una vez que se tienen los resultados obtenidos, por las metodologías cualitativas y cuantitativas, se tiene la necesidad de decidir si el riesgo se acepta o no. Este punto termina siendo arbitrario porque cada industria selecciona los criterios de aceptabilidad.

Cuando se toma una decisión, que compete a la seguridad, es muy recomendable que se cuente con material gráfico donde se representen los índices de riesgos, frecuencias y consecuencias de la toma de decisiones. La opción a elegir, entre los distintos procesos y configuraciones, siempre debe ser aquella que represente el menor índice de riesgo.

Una herramienta muy poderosa con la que cuenta la ingeniería de procesos es la optimización. En un proceso, la optimización permite definir los valores de las variables manipulables para obtener el mejor valor de una variable de respuesta

específica, la cual se conoce como función objetivo.

Actualmente, las necesidades de los procesos demandan el desarrollo de optimizaciones que hagan frente a distintos aspectos; los más usuales son los objetivos económicos y ambientales, a esto se le conoce como optimización multiobjetivo. Para el caso de una optimización multiobjetivo, la seguridad siempre debe ir por encima del objetivo económico y ambiental. Se debe recordar siempre el lema "Safety First".

Es fundamental resaltar la importancia de las metodologías de análisis de riesgo, tanto cualitativas como cuantitativas. Con la aplicación de estos procedimientos se obtienen las siguientes ventajas:

- Mejora la seguridad inherente. Esto quiere decir que minimiza o posiblemente elimina el riesgo utilizando materiales y condiciones de proceso que no sean tan peligrosas. Por ejemplo, la sustitución de un solvente inflamable por agua.
- Promueve el uso de la distancia para reducir los efectos peligrosos. Por ejemplo, colocar el proceso lo más lejos posible de zonas altamente pobladas.
- Minimiza el riesgo a través de las características de diseño de equipo y proceso; lo anterior reduce la frecuencia o la consecuencia del riesgo.



- Incentiva el uso de instrumentación como interlocks, alarmas y controles de seguridad.
- Estimula el desarrollo de procedimientos operacionales, capacitaciones, comprobaciones administrativas, entre otras actividades para la gestión de seguridad.
- Simplifica el diseño de las instalaciones. De esta manera, se elimina la complejidad innecesaria y hacen que los errores operativos sean menos probables.

Debido al desgaste de equipos, errores de calibración, capacitaciones deficientes del personal, se puede suponer que en los procesos industriales es imposible eliminar los riesgos completamente y menos en la industria química. Sin embargo, es responsabilidad de toda la planta sumar esfuerzos para reducirlo dentro de las restricciones económicas que puedan existir.

Así, el compromiso de los directivos debe ser la toma de decisiones basada en el menor riesgo, incluso sobre el aspecto económico. Los ingenieros de proceso deben diseñar procedimientos eficaces y productivos sin poner en riesgo la integridad de los trabajadores y comunidad circundante. Los operadores deben seguir los protocolos de seguridad con estricto apego; de igual manera, éstos deben reportar cualquier anomalía que detecten, y, sobre todo, promover siempre la seguridad entre los compañeros.

## 2.2 Aplicación del método

La metodología descrita en la sección 2.1 es utilizada hasta nuestros días y en diversas investigaciones. Algunos ejemplos de su aplicación son:

- Medina y col. (2014) incluyen la metodología de seguridad para la selección de solventes en sistemas de destilación extractiva.
- Martínez y col. (2017) emplean el análisis de riesgo para definir la mejor tecnología para alcanzar la mayor calidad de gas de síntesis con el menor riesgo en condiciones simuladas.
- Contreras y col. (2018) utilizan la metodología de análisis cuantitativo para el diseño de la sección de purificación para la producción de furfural.
- Ramírez y col. (2019) optimizan tres distintos procesos para la obtención de silicón grado solar considerando aspectos ambientales, económicos y de seguridad.
- Deshpande y col. (2022) consideran la metodología del análisis cuantitativo en la optimización del proceso de producción de biodiésel proveniente de algas.

## 2.3 Avances en el análisis cuantitativo de riesgo

Desde la publicación de “*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*” (CCPS,



2000), diversas investigaciones han surgido para proponer distintos índices de seguridad, y, con ellos, obtener un mayor alcance. Algunos ejemplos son Process route index (PRI), Safety Index (SI) y Safety and sustainability weighted return on investment metric (SASWROIM).

### 2.3.1 Process Route Index (PRI).

A pesar de que el QRA es una metodología detallada y completa presenta algunas dificultades para su aplicación; tal es el caso de la falta de experiencia y conocimiento por parte de los ingenieros de proceso en su implementación desde la etapa de diseño (Leong y col., 2009). Además, la complejidad en sus cálculos desincentiva a la industria (Leong y col., 2009).

Para subsanar la necesidad de tener índices de seguridad con menor rigurosidad matemática se desarrollan los siguientes: PIIS, ISI, e i-Safe (Rahman y col., 2005); sin embargo, presentan un inconveniente, no pueden ser utilizados para mezclas, únicamente son para sustancias puras.

Leong y col. (2009) proponen el índice cuantitativo PRI definido por la ecuación 12. La fortaleza de este índice es que no sólo presenta una menor rigurosidad matemática que el QRA, sino también, tiene aplicación para sistemas constituidos por mezclas.

$$PRI = \frac{(H_{prom})(\delta_{prom})(P_{prom})(\Delta FL_{prom})}{10^8} \quad (12)$$

$PRI$ = Índice de riesgo,  $H_{prom}$ = Entalpía promedio de la mezcla,  $\delta_{prom}$ = Densidad promedio de la mezcla,  $P$ = Presión del sistema,  $\Delta FL_{prom}$ =diferencia entre los límites de flamabilidad de la mezcla.

### 2.3.2 Safety Index (SI).

La seguridad y la controlabilidad son aspectos bastante importantes en el diseño de procesos. Por lo general, éstos son considerados a evaluación una vez finalizado el diseño del proceso. Sin embargo, es imprescindible considerar la seguridad inherente desde el inicio del desarrollo de acuerdo con la gestión de riesgos (Medina y col., 2019). Por otro lado, la importancia de la controlabilidad radica en la operabilidad del proceso; si no hay control, no se puede operar el proceso.

Una vez analizada la importancia de la seguridad y controlabilidad, Medina y col. (2019) proponen un índice que incluye ambos conceptos, SI, ecuación 13.

$$SI = \frac{DD_N}{CN_N} \quad (13)$$

$SI$ = Índice de riesgo,  $DD_N$ = Distancia con probabilidad del 50% de muerte normalizada,  $CN_N$ = Número de condición normalizado.



En el índice SI se calcula la distancia con probabilidad del 50% de muerte basándose en la metodología QRA. El número de condición se calcula mediante la descomposición del valor singular (Medina y col., 2019).

### 2.3.3 Safety and sustainability weighted return on investment metric (SASWROIM).

Actualmente, existe un creciente interés en el diseño de procesos industriales desde una perspectiva sustentable. Sin embargo, al considerar la sustentabilidad se incluyen tres aspectos: el económico, ambiental y social.

El ámbito social, dentro de la sustentabilidad, puede incluir uno o más aspectos, por ejemplo la seguridad, generación de empleos, índice de desarrollo humano, entre otros. De igual manera, diversos indicadores se encuentran en el aspecto ambiental.

Guillen y col. (2018) proponen un índice con la capacidad de integrar varios indicadores, los cuales, en su conjunto, permiten evaluar la sustentabilidad. El índice es representado por la ecuación (14).

$$SASWROIM = \frac{AEP \left[ 1 + \sum_{i=1}^{N_{\text{Indicadores}}} w_i \left( \frac{\text{Indicador}_i}{\text{Indicador}_{\text{objetivo},i}} \right) \right]}{TCI} \quad (14)$$

*SASWROIM* = índice de sustentabilidad, *AEP* = ganancia económica anual, *w* = factor de peso, *Indicador* = indicador de sustentabilidad, *TCI* = capital total de inversión. Subíndices: *i* = *i*°

indicador de sustentabilidad, *objetivo* = valor meta del indicador de sustentabilidad “*i*”.

Para incluir la evaluación de seguridad en el índice de sustentabilidad es factible utilizar tanto la metodología QRA, el PRI o cualquier otro índice. La versatilidad en los indicadores que se pueden emplear es una de las fortalezas del SASWROIM.

Guillen y col. (2018) proponen una modificación en la ecuación (14) para su implementación en área de optimización multiobjetivo, ecuación (15).

$$SASWROIM = \frac{AEP \left[ 1 + \sum_{i=1}^{N_{\text{Indicadores}}} w_i \left( \frac{\text{Indicador}_{\text{base},i} - \text{Indicador}_i}{\text{Indicador}_{\text{base},i} - \text{Indicador}_{\text{objetivo},i}} \right) \right]}{TCI} \quad (15)$$

*SASWROIM* = índice de sustentabilidad, *AEP* = ganancia económica anual, *w* = factor de peso, *Indicador* = indicador de sustentabilidad, *TCI* = capital total de inversión. Subíndices: *i* = *i*° indicador de sustentabilidad, *objetivo* = valor meta del indicador de sustentabilidad “*i*”, *base* = caso inicial del cual parten todos los escenarios.

En la tasa de indicadores, ecuación (15), el denominador representa la máxima mejora deseada en el indicador *i*° y el numerador es la mejora o el deterioro (en el caso de una diferencia negativa) asociada al nuevo escenario.

### 3. Conclusiones

De manera general, en el presente documento se abordan algunas de las metodologías empleadas para el análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos; estas metodologías tienen un impacto positivo en la seguridad inherente de los procesos.



La seguridad inherente debe ser implementada desde la fase de diseño de proceso. Es fundamental implementar las técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo para garantizar la seguridad inherente de procesos.

En las optimizaciones multiobjetivo, la función objetivo de seguridad debe considerarse en todas las investigaciones; asimismo, la función objetivo de seguridad debe tener la mayor importancia sobre funciones objetivo económicas, técnicas o ambientales.

Nada de lo que se haga justifica una lesión y menos la muerte. Todo accidente puede y debe ser prevenido. Por lo tanto, la seguridad es responsabilidad de todos.

### Referencias bibliográficas

Bethea, R.M., (1994). *Process Safety Management with Case Histories: Flixborough, Pasadena, and Other Incidents*. New York: American Institute of Chemical Engineers.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2011). *Guidelines for hazard evaluation procedures*. Wiley.

CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2<sup>nd</sup> ed. (New York: Center for Chemical Process Safety. AICHE. 2000).

Contreras-Zarazúa, G., Sánchez-Ramírez, E., Vázquez-Castillo, J., Ponce-Ortega, J.M., Errico,

M., Kiss, A.A., Segovia-Hernández, J.G. (2018). Inherently safer design and optimization of intensified separation processes for furfural production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(15), 6105-6120.

Crowl, D.A., Louvar, J.F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Pearson Education.

Deshpande, G., Shrikhande, S., Patle, D.S., Sawarkar, A.N. (2022). Simultaneous optimization of economic, environmental and safety criteria for algal biodiesel process retrofitted using dividing wall column and multistage vapor recompression. *Process Safety and Environmental Protection*, 164, 1-14.

Guillen-Cuevas, K., Ortiz-Espinoza, A.P., Ozinan, E., Jiménez-Gutierrez, A., Kazantzis, N.K., El-Halwagi, M.M. (2018). Incorporation of safety and sustainability in conceptual design via a return on investment metric. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1411-1416.

Howard, W.B. Seveso: Cause; Prevention, *Plant/Operations Progress*, 4(2): 103–104.

Kletz, T.A. “The Flixborough Explosion—Ten Years Later,” *Plant/Operations Progress* (July 1984), 3(3): 133–135.

Leong, C.T, Mohd-Shariff, A. (2009). Process route index (PRI) to assess level of explosiveness for inherent safety quantification. *Journal of Loss*



*Prevention in the Process Industries*, 22(2), 216-221.

Martinez-Gomez, J., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M. El-Halwagi, M.M. (2017). Optimization of the production of syngas from shale gas with economic and safety considerations. *Applied Thermal Engineering*, 110, 678-685.

Medina-Herrera, N., Grossmann, I.E., Sam-Mannan, M., Jiménez-Gutiérrez, A. (2014). An approach for solvent selection in extractive distillation systems including safety considerations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(30), 12023-12031.

Medina-Herrera, N., Tututi-Ávila, S., Jiménez-Gutiérrez, A. (2019). A new index for chemical process design considering risk analysis and

controllability. *Computer Aided Chemical Engineering*, 46, 373-378.

Rahman, M., Mari-Heikkila, A., Hurme, M. (2005). Comparison of inherent safety indices in process concept evaluation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 327-334.

Ramirez-Márquez, C., Contreras-Zarazúa, G., Martín, M., Segovia-Hernández, J.G. (2019). Safety, economic, and environmental optimization applied to three processes for the production of solar-grade silicon. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5), 5355-5366.

Willey, R.J., Hendershot, D.C., Berger, S. The Accident in Bhopal: Observations 20 Years Later. *Process Safety Progress*, 26(3), 180-184.