

REVISTA AICHE - PERÚ

Acompáñanos a ver nuestras actividades a lo largo del primer semestre del año



Bienvenida

AICHE PERÚ | LOCAL SECTION

PRESIDENTE AICHE PERU

Baltazar Nicolás Cáceres

JUNTA DIRECTIVA

Nicolas caceres

Luis Torres

Alexander Maslucan

Gian Lozano

Gabriela Villasante

CONSEJO OPERATIVO

Luis Torres

Alí Paco

Gabriela Villasante

EDICIÓN GENERAL

Nolvert Huaman Minga

REDACTORES

Rodrigo Niño de Guzman

Leonardo Pillco Zevallos

INFORMACIÓN DE CONTACTO

blog@aiiche.org.pe

(+51)986212480

Esta revista es una producción de AIChE Perú. Está prohibida su copia, reproducción total o parcial, distribución o difusión por cualquier medio sin la autorización expresa de la organización.

AIChE Sección Perú, es una organización sin fines de lucro creada en julio del 2020, parte del Instituto Americano de Ingenieros Químicos Global, que te brinda recursos y la experiencia que necesitas para crecer profesional y personalmente, para ampliar tus oportunidades de desarrollo profesional y liderazgo.

La junta directiva actual tiene el propósito de consolidar una comunidad conformada por profesionales de la industria, la academia, y el gobierno para empoderarnos unos a otros colectivamente hacia la excelencia en ingeniería química encontrando las soluciones globales a los desafíos de la ingeniería en el Perú y educando a la siguiente generación de ingenieros líderes que utilizando tecnologías transformacionales conviertan los recursos naturales del país haciendo un mundo de bien.

Estamos enmarcados en las prioridades estratégicas de la organización buscando expandir la asociación y colaboración en capacitación y desarrollo profesional, y mejorando el compromiso bajo el principio de que todos aquellos que deseen formar parte de la comunidad de ingeniería química deben tener las mismas oportunidades de alcanzar el éxito y el progreso, en un entorno caracterizado por la inclusión, la diversidad, la equidad, el antirracismo y el aprendizaje. Como resultado tenemos en trámite un convenio con el Colegio de Ingenieros del Perú y un primer contacto con el sector empresarial del país para fortalecer su competitividad.

Creemos rotundamente que los ingenieros químicos son vitales para el futuro de la sociedad para enfrentar los desafíos del desarrollo sostenible y adaptar la sociedad humana hacia la sostenibilidad. Los invitamos cordialmente a ser parte de nuestra comunidad.

La Junta Directiva
AIChE Sección Perú

CONTENIDO

■ 01	Bienvenida 02 Junta Directiva
■ 02	Artículos Técnicos 04 La separación de partículas por tamaño en hidrociclones Mejorando la Gestión de la Seguridad de Procesos a través de Métodos END con Alta Probabilidad de Detección El Rol del Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) en la Gestión de Riesgos.
■ 03	Sección Especial 30 Los Desafío y Oportunidades de la maternidad en la Industria
■ 04	Noticias AIChE Perú 33 SBE UTEC – Impulsando la Biotecnología y la Innovación Transformación Científica desde las Aulas: Resultados del Programa K-12 de AIChE Perú
■ 05	AIChE Calendar 37

LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS POR TAMAÑO EN HIDROCICLONES

Sandra Elena Pajares Centeno
Ingeniería Química, Especialista en Project Management

En el ámbito de la ingeniería de procesos, la separación de partículas por tamaño es una técnica esencial para la optimización de diversos sistemas industriales, especialmente en el procesamiento de minerales, en la producción de arenas, en la industria química, y en el tratamiento de aguas residuales. (Cao, 2022)

Entre las tecnologías disponibles para llevar a cabo esta separación, el hidrociclón destaca por su eficiencia y versatilidad en la clasificación de partículas en función de su tamaño y densidad. Los hidrociclones se valen de la fuerza centrífuga generada por el flujo de fluido para separar partículas de diferentes tamaños y pesos, lo que les permite manejar altas cargas de sólidos y velocidades de separación. (Gonçalves, 2020).

A diferencia de otros métodos de separación como las cribas o los filtros, los hidrociclones carecen de partes móviles, lo que facilita su mantenimiento y los hace especialmente adecuados para operar en condiciones industriales exigentes. Este tipo de dispositivo es ampliamente utilizado en el sector minero, donde la separación de partículas de diferentes tamaños puede mejorar el rendimiento de los procesos de molienda y flotación (Baranov et al., 2007). Asimismo, el diseño y funcionamiento del hidrociclón lo convierten en un recurso valioso para la clasificación de partículas en diversas industrias que necesitan realizar separaciones rápidas y eficientes. (Viera, 2005)

La clasificación de partículas mediante hidrociclones es un proceso influenciado por variables de diseño y operación, tales como el tamaño de los ciclones, la presión de alimentación y la granulometría del material. El correcto ajuste de estas variables es crucial para maximizar la eficiencia de separación, minimizar la pérdida de partículas valiosas en el flujo de desecho, y reducir el consumo de energía. Además, el estudio de estos factores es fundamental para la investigación en ingeniería de separación, ya que permite el desarrollo de modelos predictivos que optimizan el proceso y mejoran el desempeño general del sistema de hidrociclones. (Narasimha, 2014)

En los últimos años, se han desarrollado modelos semi-mecanicistas y empíricos que buscan relacionar las condiciones de operación y diseño con la eficiencia del proceso de separación en hidrociclones. Estos modelos han sido implementados con éxito para predecir la recuperación de partículas en función de la granulometría y la densidad de los sólidos presentes en la suspensión. Sin embargo, dado que la eficiencia del proceso depende en gran medida de las condiciones específicas de operación y de la naturaleza del material, los investigadores han explorado constantemente nuevas configuraciones de hidrociclones y estrategias operativas para mejorar la eficiencia de clasificación. (Li, 2019)

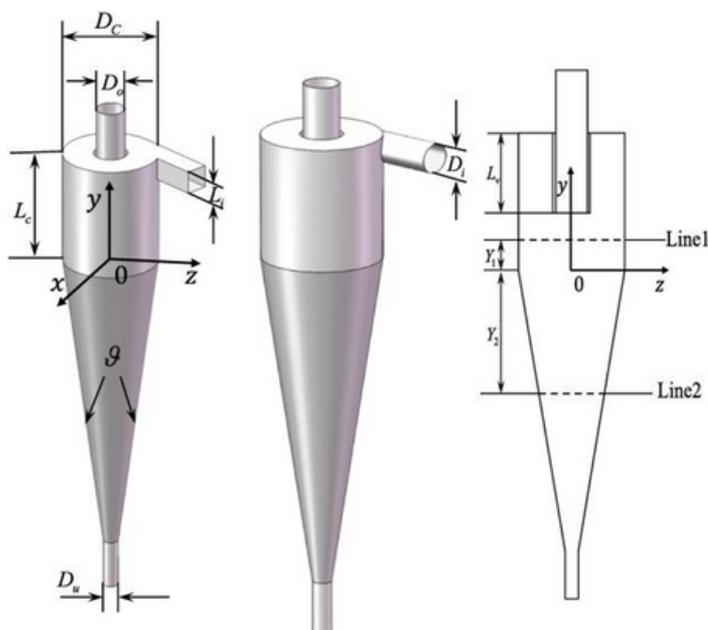
A lo largo de este artículo, se analizan los principios de funcionamiento de los hidrociclones, las principales variables operativas que influyen en la eficiencia de separación y los modelos actuales que buscan optimizar la clasificación de partículas en función de su tamaño. Además, se discuten las limitaciones de los hidrociclones y las posibles mejoras en diseño y operación que podrían implementarse para obtener un rendimiento óptimo en diversas aplicaciones industriales.

DESARROLLO

1. Principio de funcionamiento del hidrociclón

El hidrociclón es un separador mecánico que, mediante fuerzas centrífugas, clasifica las partículas de una suspensión en función de su tamaño y densidad. El flujo de entrada de suspensión se inyecta tangencialmente en el dispositivo, creando un vórtice que separa las partículas hacia la pared externa en el caso de las más grandes y densas (circuito grueso) y al eje central para las más finas (circuito fino), que se eliminan en el vórtice interno. La eficiencia de clasificación depende de varios factores, como la presión de operación, el tamaño de entrada del hidrociclón y la viscosidad del fluido. (Krassimir, 2019)

Figura N°01. Estructura geométrica del hidrociclón



Nota: (Wang et al., 2024)

2. Variables Operativas y su Impacto en la Separación

A. Tamaño y Diseño del Hidrociclón

El diseño y tamaño del hidrociclón afectan la fuerza centrífuga generada dentro del dispositivo y, por ende, la eficiencia de la separación (Bicalho, 2013). Los hidrociclones con un diámetro de vórtice más pequeño suelen ser más efectivos para la clasificación de partículas finas, ya que permiten una mayor precisión en la separación. Sin embargo, el diseño debe equilibrarse para evitar obstrucciones en la entrada y salida de la suspensión. (Hwang, 2013). El ajuste del ángulo de la sección cónica del hidrociclón puede optimizar el flujo y mejorar la eficiencia, logrando una separación más efectiva al reducir la mezcla de partículas finas y gruesas en la misma corriente. (Saidi, 2013)

B. Presión de Operación

La presión de alimentación del hidrociclón es otra variable crítica que impacta en el rendimiento de la separación. Una mayor presión incrementa la velocidad del fluido y la fuerza centrífuga en el hidrociclón, lo que tiende a mejorar la separación de partículas de distinto tamaño (Necesse, 2015). Sin embargo, el uso de presiones excesivamente altas puede provocar el fenómeno de re-entrainment, donde las partículas finas se ven forzadas hacia el flujo de gruesos debido a la turbulencia en el vórtice. Este fenómeno reduce la eficiencia de separación y puede impactar negativamente en la recuperación de partículas de menor tamaño en el flujo de finos. (Mahat, 2023)

En el caso de suspensiones o pulpa con alta densidad de sólidos, una presión moderada puede ser suficiente para lograr una separación efectiva, mientras que, en suspensiones de baja densidad, una presión ligeramente mayor puede mejorar la clasificación sin provocar una mezcla excesiva de las partículas. (Nesse, 2015)

C. Granulometría de Partículas

La granulometría es clave en la eficiencia de separación en hidrociclones, especialmente cuando el material presenta una amplia distribución de tamaños, como ocurre con partículas de cuarzo. En estos casos, el uso de modelos semi-mecanicistas permite predecir con mayor precisión la separación de tamaños óptima en función de la carga de sólidos y la velocidad del fluido. (Daza, 2020)

D. Carga de Sólidos

La concentración de sólidos en la suspensión también tiene un impacto directo en la separación de partículas. Un aumento en la carga de sólidos puede provocar un mayor desgaste en las paredes del hidrociclón y reducir la eficiencia de clasificación debido a la formación de una capa de partículas gruesas que bloquea la salida de partículas finas. (Gonçalves et al., 2022)

3. Modelos de Eficiencia y su Aplicación

La eficiencia de separación en hidrociclones puede evaluarse y optimizarse mediante distintos modelos teóricos y empíricos. Estos modelos permiten a los ingenieros predecir y ajustar la recuperación de partículas en función de sus tamaños, densidades y de las condiciones de operación. La implementación de modelos de eficiencia es crucial para mejorar la exactitud de la clasificación de partículas en aplicaciones industriales, minimizando pérdidas de materiales valiosos y mejorando el rendimiento de los procesos. (Mahat, 2023).

A. Modelo de Eficiencia de Corte o "Cut-Point"

El modelo de eficiencia de corte o "cut-point" es uno de los métodos más utilizados para medir la eficacia de un hidrociclón. Este modelo define el tamaño de partícula d_{50} , en el cual la probabilidad de que una partícula sea capturada en el flujo de gruesos (underflow) es del 50%. (Izquierdo, 2021).

Este parámetro se utiliza para caracterizar el punto de separación y, a partir de él, se establecen los umbrales para partículas que se consideran finas o gruesas en el sistema así el d_{50} es particularmente sensible a factores como la presión de alimentación, el diseño del ciclón y la densidad de las partículas, por lo que ajustar estos factores permite optimizar la separación de partículas en diferentes aplicaciones industriales. (Hou, 2022)

B. Modelos de Balance de Fuerzas y Semi-Mecanicistas

Los modelos de balance de fuerzas consideran las fuerzas centrífugas, de arrastre y gravitacionales que actúan sobre las partículas dentro del hidrociclón, permitiendo una estimación más detallada de la eficiencia. Estos modelos semi-mecanicistas, como el modelo de Rietema y el modelo de Bradley, utilizan ecuaciones que describen las trayectorias de las partículas basándose en las fuerzas presentes y en las características de la suspensión. Estos modelos son especialmente útiles para aplicaciones en minería y tratamiento de minerales, donde las partículas suelen tener densidades y tamaños muy variados. (Narasimha, 2014)

El uso de modelos semi-mecanicistas es común en situaciones donde se requiere una separación precisa de partículas finas. Por ejemplo, en el procesamiento de cuarzo con granulometría variable, estos modelos permiten predecir la eficiencia en función del tamaño de las partículas y de las condiciones específicas de operación del hidrociclón, como la presión de alimentación y el tamaño del vórtice (Narasimha, 2014). Así, los modelos de balance de fuerzas permiten un control más detallado y mejoran la previsión de eficiencia en la clasificación de partículas. (Ye, 2022)

Aplicación y Ventajas de los Modelos de Eficiencia en la Industria

La aplicación de estos modelos en la industria permite una optimización precisa de los hidrociclones en una variedad de procesos. El uso de un modelo adecuado en función de las características de la suspensión y del sistema de hidrociclones permite ajustar las condiciones de operación para maximizar la recuperación de partículas de interés y minimizar el desperdicio. (Zhao, 2023)

En el procesamiento de minerales, el modelo de eficiencia de corte y los modelos semi-mecanicistas ayudan a controlar el tamaño de partículas en los flujos de alimentación para los procesos de molienda y flotación, mejorando la eficiencia global del proceso. Además, en el tratamiento de aguas, estos modelos permiten optimizar la eliminación de partículas finas y contaminantes, mejorando la calidad del agua tratada. (Vilamalla, 2021).

4. Limitaciones de los Hidrociclones

1. Precisión en la separación de Partículas Finas

Los hidrociclones tienden a ser menos precisos en la clasificación de partículas finas debido a la naturaleza de las fuerzas centrífugas y de arrastre que actúan sobre estas partículas. Esto afecta la recuperación de materiales de tamaño reducido, como minerales valiosos o partículas de metales preciosos, reduciendo la eficacia en aplicaciones donde se requiere una alta precisión en la separación de finos. (Zhao, 2023).

2. Desgaste del equipo

La operación de hidrociclones genera un desgaste significativo debido a la abrasión de partículas duras en los materiales del equipo.

Este problema es más pronunciado en el procesamiento de minerales y en la industria de áridos, donde las partículas clasificadas son altamente abrasivas. El desgaste reduce la vida útil de los hidrociclones y afecta su eficiencia de operación, aumentando costos de mantenimiento y reemplazo. (Gao, 2022)

3. Dependencia de Variables Operativas

Los hidrociclones son altamente sensibles a variables operativas como la presión de alimentación, la densidad de la suspensión y el flujo volumétrico. Esto puede provocar inestabilidad en los resultados de separación y complicar el control del proceso en operaciones de gran escala o cuando hay fluctuaciones en las características de la suspensión. (Bicalho, 2013)

4. Limitaciones en la Eficiencia Energética

Aunque los hidrociclones son eficientes en términos de energía comparados con otros equipos de separación, pueden requerir altos niveles de presión y flujo para lograr una separación efectiva, especialmente en sistemas de clasificación de partículas finas. Esto representa una limitación en industrias que buscan reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones. (Wang, 2006)

5. Posible Mejoras

- Incorporar revestimientos de materiales resistentes, como cerámicas o compuestos de caucho, ayuda a reducir el desgaste y prolonga la vida útil del equipo. Este tipo de revestimientos reduce la frecuencia de mantenimiento y reemplazo, mejorando la consistencia de la eficiencia de separación a lo largo del tiempo.
- Mejorar el diseño del vórtice puede optimizar la separación, especialmente para partículas finas. Esto incluye ajustes en la longitud y diámetro del vórtice, así como en la geometría del cono y el cilindro, lo que aumenta la precisión de la separación y disminuye las pérdidas de partículas finas en el flujo de gruesos.

El diseño del vórtice permite un mayor control de las trayectorias de las partículas, mejorando la eficiencia en aplicaciones de minerales y arenas.

- La implementación de sistemas de hidrociclones de dos etapas o en serie mejora la precisión de la separación al permitir una clasificación progresiva de partículas en función de su tamaño y densidad. Este enfoque es útil para la recuperación de partículas finas en la industria minera y en el procesamiento de materiales donde los tamaños de partículas varían ampliamente.
- Incorporar sistemas automatizados de control de presión y caudal permite estabilizar las condiciones de operación, ajustando la presión de alimentación en tiempo real para mantener la eficiencia en la separación. La automatización es particularmente valiosa en aplicaciones de gran escala, ya que permite ajustar las condiciones rápidamente para adaptarse a las variaciones en la composición de la suspensión.
- Los sistemas de recirculación de finos en los hidrociclones permiten mejorar la recuperación de partículas valiosas al reintroducir las partículas finas en el proceso de clasificación. Este sistema reduce las pérdidas de material valioso en el flujo de finos, incrementando la eficiencia del proceso y optimizando la recuperación en aplicaciones como la minería y el procesamiento de minerales.

- La utilización de modelos matemáticos avanzados y simulaciones computacionales permite prever el rendimiento del hidrociclón bajo diferentes condiciones y ajustar los parámetros de operación de manera anticipada. Modelos como los de balance de fuerzas y de corte pueden ser implementados en simulaciones, permitiendo a los ingenieros realizar ajustes en el diseño o la operación para maximizar la eficiencia.

Referencias

- Baranov, et al. (2007). Hydrocyclones for the chemical industry and cleaning devices for circulating and waste water. Chemical and Petroleum Engineering. <https://doi.org/10.1007/S10556-007-0069-X>
- Bicalho, et al. (2013). Effects of Operating Variables on the Yeast Separation Process in a Hydrocyclone. Separation Science and Technology. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.712597>
- Cao, et al (2022). Effects of particle size on the separation efficiency in a rotary-drum eddy current separator. Powder Technology. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117870>
- Daza, et al (2020). Influence of the feed particle size distribution on roping in hydrocyclones. Minerals Engineering. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2020.106583>
- Gao et al (2022). Experiment of hydrocyclone under different inlet velocity and its wear analysis of wall and particle. Powder Technology. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117541>

- Hou, et al (2022). Geometrical configuration of hydrocyclone for improving the separation performance. *Advanced Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.103419>
- Hwang, et al (2013). Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2011.12.046>
- Izquierdo, et al (2021). Effect of the Technique Used for the Particle Size Analysis on the Cut Size of a Micro-hydrocyclone. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54410-2_21
- Krassimir, I. (2019). Hydrocyclone for a comminution circuit.
- Li, et al (2019). Prediction of separation performance of hydrocyclones by a PC-based model. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2018.09.073>
- Mahat, M. M. (2023). Separation efficiency analysis of multiphase flow inside hydrocyclone using CFD. <https://doi.org/10.24191/jaeds.v3i1.62>
- Narasimha, et al (2014). A semi-mechanistic model of hydrocyclones – Developed from industrial data and inputs from CFD. *International Journal of Mineral Processing*. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2014.08.006>
- Neesse, et al (2015). Using a high pressure hydrocyclone for solids classification in the submicron range. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.10.017>
- Saidi, et al (2013). Numerical investigation of cone angle effect on the flow field and separation efficiency of deoiling hydrocyclones. *Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1007/S00231-012-1085-8>
- Vakamalla, et al (2021). Comprehensive Dense Slurry CFD Model for Performance Evaluation of Industrial Hydrocyclones. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.1C01244>
- Vieira, et al (2005). Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000100015>
- Wang, et al (2006). Investigation on separation efficiency of liquid/solid hydrocyclone. *Journal of Hydrodynamics*. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60085-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60085-1)
- Wang et al (2024). Investigation of the asymmetric flow structure in a hydrocyclone. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, doi:10.1002/apj.3080
- Ye, et al (2022). Multi-objective optimization of hydrocyclone by combining mechanistic and data-driven models. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117674>
- Zhao, et al (2023). Evaluation and improvement of mathematical models for hydrocyclone classifiers part I: Laboratory scale. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118718>

MEJORANDO LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD DE PROCESOS A TRAVÉS DE MÉTODOS END CON ALTA PROBABILIDAD DE DETECCIÓN

Alberto Reyna Otayza, Presidente de Ademinsa

Manuel Vergara Segura, Gerente de Seguridad de Procesos e Integridad Mecánica de Ademinsa

En un Sistema de Gestión de Seguridad de Procesos, el elemento Integridad y Confiabilidad de Activos tiene relación directa con la prevención de eventos con pérdida de contención primaria que pueden resultar en la liberación de materiales peligrosos con potenciales consecuencias catastróficas para las mismas empresas y la sociedad, tales como incendios, explosiones o emisiones tóxicas. Aunque la integridad mecánica se asocia frecuentemente con el control del deterioro de materiales de construcción, su alcance es mucho más amplio.

Un marco robusto de integridad mecánica incluye:

- **Control del Deterioro de Materiales:** Asegurar la integridad estructural a través de programas efectivos de inspecciones, pruebas y mantenimiento preventivo (actividades ITPM). La efectividad de las inspecciones depende de selección del método(s) END, su capacidad en términos de la probabilidad de detección (POD, en adelante) de mecanismos de daño, la posibilidad de establecer la tasa de deterioro / susceptibilidad del material, y de la cobertura de las inspecciones.
- **Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS):** Sistemas automatizados diseñados para prevenir o mitigar eventos peligrosos mediante la activación de funciones de protección, incluyendo los sistemas de parada de emergencia.
- **Gestión de Alarmas:** Garantizar que las acciones esperadas por el operador se hayan preidentificado como respuesta para cada tipo de alarma que se active, de manera oportuna para evitar el escalamiento de escenarios peligrosos, asegurando el entendimiento y toma de conciencia de las situaciones (situation awareness).

- **Ventanas Operativas de Integridad (IOW):** Límites operativos definidos para monitorear parámetros del proceso, mantener condiciones seguras a lo largo del tiempo y evitar la generación de mecanismos de daño.
- **Proceso de gestión del cambio (MOC):** Para la identificación y gestión de riesgos derivados de cambios físicos, de software y organizacionales que incrementen la severidad de los riesgos existentes o impliquen la aparición de nuevos riesgos.

En este contexto integral, un atributo clave de los métodos END es la probabilidad de detección (POD), la cual se define como la "fracción de los tamaños de discontinuidad nominal que se esperan encontrar, dada su existencia". Para este efecto, se llevan a cabo tests para evaluar la probabilidad de detección de un número de defectos en base a sus parámetros característicos especificados, por ejemplo, su tamaño. Por cierto, la POD se incrementa con el tamaño de los defectos; ver la Figura 1.

Figura N°01. Curva de POD

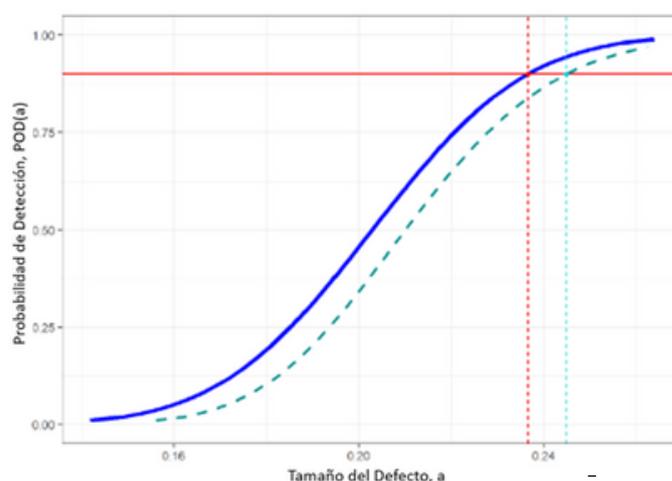


Figura N°01. Curva de POD muestra que en la medida que el tamaño de defecto se aproxima a cero, la POD se reduce y viceversa. POD(a) representa la POD de un defecto con tamaño a. Por otro lado, el avance tecnológico aplicado a métodos END ha permitido su desarrollo significativo, lográndose altas probabilidades de detección (en adelante, métodos END con high-POD) de mecanismos de daño, con métodos de ensayo que han sido probados estadísticamente para detectar defectos –aun siendo muy pequeños–, con alto grado de certeza. Esta capacidad, representa una ventaja sobre los métodos END convencionales, en especial en la industria de altos riesgos, en la cual los defectos no detectados pueden resultar en incidentes catastróficos.

Ver la Tabla 1, para una comparación resumida entre los distintos atributos de los métodos END convencionales y los métodos END con high-POD.

Forma cómo los Métodos END con high-POD Mejoran la Integridad Mecánica

Los métodos END con high-POD han revolucionado los programas de integridad mecánica al abordar las limitaciones de las técnicas END tradicionales e incrementar la efectividad de las inspecciones. Sus capacidades avanzadas permiten a los operadores detectar y mitigar riesgos de manera eficiente, contribuyendo a los objetivos generales de integridad mecánica y de la seguridad de procesos de reducir los riesgos de eventos con pérdida de contención primaria.

Tabla 1. Comparación entre Métodos END convencionales y Métodos high-POD

Característica	Métodos Convencionales	Métodos con Alta POD
Sensibilidad en la detección	Sensibilidad moderada; puede no detectar defectos pequeños o en etapas iniciales, especialmente en condiciones adversas.	Capacidad de detectar defectos pequeños o en etapas iniciales con alta confiabilidad.
Cobertura de inspecciones	Limitado a inspecciones en zonas localizadas; requiere más tiempo para cubrir grandes áreas o áreas de difícil acceso.	Capaz de inspeccionar grandes áreas o largas secciones de tuberías de manera eficiente; p. ej., a través de aislamientos térmicos o similares, o en secciones enterradas.
Detección dinámica	Básicamente limitado a detección en forma estática, no tienen capacidad de detección de progresión del daño en tiempo real.	Efectivo en identificar defectos activos; p. ej., propagación de grietas.
Disrupción de operaciones	A menudo se requiere la detención de operaciones, retiro de recubrimientos, o preparación de superficies.	Requiere detenciones mínimas; muchos métodos high-POD pueden ser aplicados sin interrumpir las operaciones
Eficiencia de costos	Costos altos, debido a demoras operativas, preparación de superficies, y pruebas localizadas.	Reducción de costos a largo plazo debido a inspecciones más rápidas, menos preparación de superficies y detenciones reducidas.

A continuación, a manera de ejemplo, se detallan los beneficios de tres métodos END con high-POD: Ensayo de Corrientes de Eddy Pulsadas (PECT), el Ensayo de Emisión Acústica (AET) y el Ensayo de Ondas Guiadas (GWT).

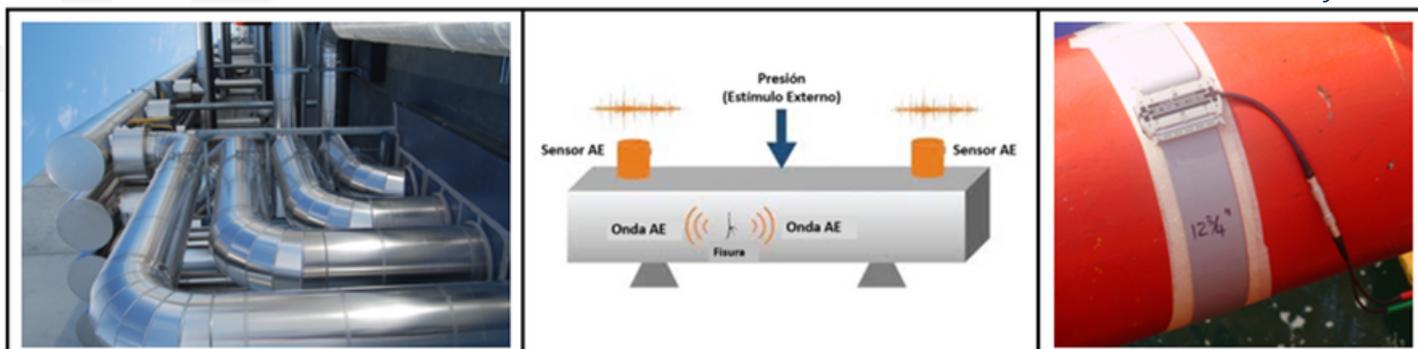
Tabla 2. Métodos END con high-POD: Ventajas Clave sobre Métodos Tradicionales y su Contribución a la Reducción de Riesgos.

Método END high-POD	Características clave	Ventajas sobre métodos convencionales	Contribución con la reducción de riesgos
Ensayo de Corrientes de Eddy Pulsadas (PECT)	Método de ensayo electromagnético. Eficaz para inspeccionar a través de recubrimientos, aislamiento o protección contra incendios.	Capacidad de inspección de sistemas de tuberías y recipientes que utilizan aislamientos o protección contra incendios sin su remoción, reduciendo tiempo y costos. Alta sensibilidad a reducción de espesor de pared por corrosión y grietas muy finas. Inspecciones de alta velocidad: cobertura rápida de grandes superficies.	Detecta en forma temprana y confiable adelgazamientos de pared y grietas muy finas de tuberías y recipientes, especialmente por corrosión bajo aislamiento (CUI), asegurando mantenimiento proactivo.
Ensayo de Emisión Acústica (AET)	Detecta ondas sonoras de alta frecuencia de mecanismos de defectos activos como propagación de grietas y corrosión.	Monitoreo en tiempo real sin detener equipos. Detecta defectos activos, a diferencia de métodos tradicionales que solo identifican daños existentes. Cubre grandes volúmenes con una colocación mínima de sensores. Reemplaza a las pruebas hidrostáticas.	Identificación temprana de mecanismos de daño activo, evitando su escalada hacia eventos de pérdida de contención.
Ensayo de Ondas Guiadas (GWT)	Ensayo ultrasónico que utiliza ondas guiadas mediante transductores de anillos para escaneo de longitudes largas de tuberías a ambos lados del anillo. Con sensores magnetostrictivos, se pueden inspeccionar recipientes a presión y tanques de almacenamiento.	Inspecciona largas secciones de tuberías, incluidas secciones inaccesibles o enterradas, sin excavación, con 100% de cobertura volumétrica. Alta sensibilidad a corrosión y grietas en distancias extendidas. Inspección más rápida en comparación con ultrasonido aplicado en puntos y secciones discretas de las tuberías. Capacidad de inspeccionar en servicio y reducción significativa de costos de acceso. No requiere acople y prácticamente no requiere preparación superficial.	Detecta eficientemente defectos a lo largo de la superficie de tuberías extensas, asegurando mantenimiento oportuno y reduciendo riesgos de pérdida de contención.

A continuación, a manera de ejemplo, se detallan los beneficios de tres métodos END con high-POD: Ensayo de Corrientes de Eddy Pulsadas (PECT), el Ensayo de Emisión Acústica (AET) y el Ensayo de Ondas Guiadas (GWT).

Tabla 2. Métodos END con high-POD: Ventajas Clave sobre Métodos Tradicionales y su Contribución a la Reducción de Riesgos.

Método END high-POD	Características clave	Ventajas sobre métodos convencionales	Contribución con la reducción de riesgos
Ensayo de Corrientes de Eddy Pulsadas (PECT)	Método de ensayo electromagnético. Eficaz para inspeccionar a través de recubrimientos, aislamiento o protección contra incendios.	Capacidad de inspección de sistemas de tuberías y recipientes que utilizan aislamientos o protección contra incendios sin su remoción, reduciendo tiempo y costos. Alta sensibilidad a reducción de espesor de pared por corrosión y grietas muy finas. Inspecciones de alta velocidad: cobertura rápida de grandes superficies.	Detecta en forma temprana y confiable adelgazamientos de pared y grietas muy finas de tuberías y recipientes, especialmente por corrosión bajo aislamiento (CUI), asegurando mantenimiento proactivo.
Ensayo de Emisión Acústica (AET)	Detecta ondas sonoras de alta frecuencia de mecanismos de defectos activos como propagación de grietas y corrosión.	Monitoreo en tiempo real sin detener equipos. Detecta defectos activos, a diferencia de métodos tradicionales que solo identifican daños existentes. Cubre grandes volúmenes con una colocación mínima de sensores. Reemplaza a las pruebas hidrostáticas.	Identificación temprana de mecanismos de daño activo, evitando su escalada hacia eventos de pérdida de contención.
Ensayo de Ondas Guiadas (GWT)	Ensayo ultrasónico que utiliza ondas guiadas mediante transductores de anillos para escaneo de longitudes largas de tuberías a ambos lados del anillo. Con sensores magnetostrictivos, se pueden inspeccionar recipientes a presión y tanques de almacenamiento.	Inspecciona largas secciones de tuberías, incluidas secciones inaccesibles o enterradas, sin excavación, con 100% de cobertura volumétrica. Alta sensibilidad a corrosión y grietas en distancias extendidas. Inspección más rápida en comparación con ultrasonido aplicado en puntos y secciones discretas de las tuberías. Capacidad de inspeccionar en servicio y reducción significativa de costos de acceso. No requiere acople y prácticamente no requiere preparación superficial.	Detecta eficientemente defectos a lo largo de la superficie de tuberías extensas, asegurando mantenimiento oportuno y reduciendo riesgos de pérdida de contención.



Nota:

Izquierda: PECT- aplicado sobre tuberías con aislamientos térmicos / protecciones contra incendios.

Centro: AER - principios de emisión de ondas acústicas en estructura sometida a un estrés extremo.

Derecha: DWT - anillo transductor instalado en tubería para el inicio de pruebas de ondas guiadas.

Conclusión

La inclusión de métodos END con high-POD mejora significativamente los programas de integridad mecánica y contribuyen con la solidez de los Sistemas de Gestión de Seguridad de Procesos al incrementar la efectividad de las inspecciones mediante la detección temprana y confiable de mecanismos de daño en etapas muy tempranas, reduciendo significativamente las interrupciones operativas y facilitando la toma de decisiones basada en datos. Los métodos descritos de PECT, el AET y el GWT desempeñan un papel fundamental en la reducción de riesgos de pérdida de contención primaria que podrían resultar en incidentes catastróficos. Un enfoque holístico a la integridad mecánica que incluya los SIS, la gestión de alarmas y las IOW, en combinación con los métodos END con high-POD definitivamente contribuirán con la reducción significativa de riesgos de seguridad de procesos.

Referencias

- American Petroleum Institute. (2023). Risk-based inspection (4th ed.). API Publishing Services.
- Center for Chemical Process Safety. (2006). Guidelines for mechanical integrity systems. Wiley-AIChE.
- U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. (1992). Process safety management of highly hazardous chemicals (29 CFR § 1910.119). Code of Federal Regulations.
- Vaario, J. K., & Dobmann, G. (2022). Pulsed eddy current testing: An advanced tool for inspecting corrosion under insulation. In C. Hellier (Ed.), Handbook of nondestructive evaluation 4.0 (pp. 451-467). McGraw-Hill.
- Miller, R. K., & McIntire, P. (2015). Acoustic emission testing: A comprehensive guide to principles and applications (2nd ed.). American Society for Nondestructive Testing.
- Rose, J. L. (2014). Ultrasonic guided waves in solid media. Cambridge University Press.

EL ROL DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS (ACR) EN LA GESTIÓN DE RIESGOS.

Eur Ing José Antonio Rodríguez Seijas MSc, CEng, MChemE, MAICHE
Consultor de Gestión de Riesgos

Sinopsis

Es un hecho que, en el ambiente operacional moderno, en donde los gobiernos, los medios y el público en general, son cada vez más conscientes y a la vez están cada vez más preocupados que nunca acerca de la seguridad, las empresas en general, y los gerentes en particular, se ven abocados a tomar decisiones cada vez más duras y difíciles, acerca de los riesgos. Estas decisiones están relacionadas fundamentalmente con aspectos tales como:

Tolerabilidad de los riesgos, o en otros términos "¿cuan seguro es suficientemente seguro?"

Diligencia Debida, o "¿cual es el precio adecuado a pagar por la seguridad?"

Gestión del Riesgo, o "¿cuáles son las opciones para reducir el riesgo?"

Gestión Inteligente, o "¿cuál es la solución óptima considerando el coste?"

La industria ha aprendido de la forma más dura que definitivamente para responder a los retos antes mencionados, no es suficiente ejercer esfuerzos mínimos provenientes de la sola aplicación de las regulaciones. La gestión adecuada de estos aspectos, conlleva la implantación de un sistema de gestión de riesgos, profundamente arraigado en el proceso de toma de decisiones de la empresa. La herramienta de Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) se enmarca dentro de ese sistema de gestión de riesgos, como uno de los elementos principales del mismo, y a la vez como uno de los más objetivos y que mejor información proveen a la hora de tomar decisiones.

Sobre ACR se han publicado innumerables textos y estudios, pero casi de forma unánime, estos normalmente explican como calcular en detalle la frecuencia y consecuencias de eventos. Muy pocos, por no decir casi ninguno, explican como combinar estos factores para producir medidas específicas del riesgo.

Este artículo trata de explicar de forma sencilla el cálculo del riesgo, y de aclarar la confusión existente sobre el significado práctico de algunos de los elementos del ACR. Igualmente, el artículo trata de definir el proceso de un ACR adecuadamente realizado, y el rol y beneficios del mismo en el proceso de toma de decisiones adecuadas e inteligentes. Al hacer esto, se ilustrará por si sola la complejidad del concepto riesgo, y el hecho de que no existe una respuesta simple y única a la pregunta, ¿qué es riesgo?

Introducción

En las últimas décadas hemos visto el desarrollo de la industria de procesos (química, petroquímica, gas y petróleo) desde sus primeros días, en los que el peligro principal estaba representado por accidentes con consecuencias muy limitadas y localizadas, hasta nuestros días, en los que esta industria ha introducido una variedad de peligros de accidentes realmente nuevos y masivos. Estos accidentes han, a través de los años, resultado en la pérdida de vidas humanas en el rango de las decenas de miles, así como en catástrofes ambientales, y pérdidas económicas inconmensurables.

No obstante, los beneficios que esta industria le ha acarreado a la sociedad son también inmensos. Basta solo con tratar de imaginar una sociedad sin coches, plásticos, u otra innumerable cantidad de productos derivados del petróleo. De esta forma, el objetivo de esta industria es el de proveer a la sociedad de estos beneficios a un coste aceptable para esa sociedad, y que al mismo tiempo permite a la industria ser económicamente viable.

Al mismo tiempo que lo anteriormente relatado ocurría, los aspectos de seguridad de la industria pasaban de ser gobernados, en los primeros tiempos, por un conjunto de reglas estrictas, y con un enfoque típico de seguridad industrial, a estar basados casi exclusivamente en el análisis y evaluación de los riesgos, y con un enfoque basado en la escala, profundidad y avances de la tecnología. Esos conjuntos de reglas rígidas regulaban desde la distancia segura de separación entre dos equipos, pasando por la altura de una chimenea de venteo, hasta la cantidad y ubicación de detectores de gas a instalar en una planta.

Fue en los años 70 cuando germinó una nueva forma de pensamiento en el tema. Esta forma distinta de ver el riesgo se basó, en lugar de la aplicación de reglas estrictas, rígidas y en forma prescriptiva, en tomar en cuenta las condiciones específicas de una instalación, evaluando cada riesgo de forma individual, y reduciéndolo hasta un nivel tal que es considerado tan bajo como razonablemente práctico, o ALARP (As Low As Reasonably Practical). Este desarrollo se basó en la premisa de que el control de los riesgos tecnológicos solo era posible a través de un sistema de gerencia de riesgos adaptado a la importancia de los mismos, y que además permitiese el análisis y control de estos riesgos tecnológicos, antes de que los mismos se manifestasen en la práctica.

Es obvio que el concepto de ALARP permite una mayor flexibilidad de las instalaciones, y potencialmente mayor eficiencia que la adhesión a ese conjunto de reglas rígidas. Permite también una mejor introducción de las mas recientes mejores prácticas y mejoras, dado que es mucho mas sencillo actualizar guías y lineamientos de lo que constituye un conjunto de mejores practicas, que actualizar un conjunto de reglas estrictas.

Desarrollo del ACR

Como es obvio, el desarrollo anteriormente relatado, trajo como consecuencia que en las últimas 3 décadas también se haya visto un desarrollo profundo y constante del ACR como herramienta fundamental para la toma de decisiones basadas en riesgo. En este sentido, las herramientas disponibles para gestionar el riesgo han avanzado considerablemente en estas últimas décadas. Hoy en día estamos en capacidad de estimar diversas medidas del riesgo postulando una serie de eventos de fallo creíbles, cuyas consecuencias y frecuencia son estimadas mediante el uso de modelos matemáticos altamente sofisticados.

Estos modelos permiten estimar desde las tasas de descarga de productos peligrosos a la atmosfera, hasta el impacto de los mismos en las personas, medio ambiente y equipos, pasando por la dispersión de esos productos peligrosos en la atmosfera circundante.

Una vez estimados los factores antes mencionados, igualmente se dispone de otros modelos matemáticos altamente sofisticados para estimar el riesgo. Una vez estimadas las diversas medidas del riesgo, es fácil determinar, en caso necesario, las medidas de control de los mismos. En algunas circunstancias, la determinación de las medidas de control conlleva la ejecución de un Análisis Coste-Beneficio, cuyo objetivo principal es reducir los riesgos hasta un nivel tolerable.

Típicamente se consideran cuatro vías distintas para una efectiva selección de las medidas de reducción y control de riesgos. Estas son:

Eliminación. Se establecen medidas para eliminar el riesgo de una forma completa, por ejemplo se cambia la tecnología de la instalación.

Reducción. Se implantan controles para reducir el riesgo a niveles de tolerabilidad (normalmente requiere una combinación de medidas administrativas y de ingeniería), por ejemplo, espaciamiento entre equipos, mejoras al sistema de ventilación de una sala de control

Aceptación. La dirección de la empresa determina que el riesgo es tolerable, normalmente basados en una evaluación cualitativa, o cuantitativa del mismo.

Transferencia. El riesgo es transferido a otros, por ejemplo, el riesgo es asegurado.

No obstante, y a pesar de todo este desarrollo, aun hoy en día no hay un entendimiento completo, o puesto de otra forma, no existe un marco común de referencia, aceptado por toda la industria, sobre lo que es análisis de riesgos, evaluación de riesgos, gestión de riesgos, e incluso ACR.

Estos términos son usualmente confundidos entre si, y generalmente usados sin conocimiento de su significado real, no solo por personas ajenas al tema, sino que también, desafortunadamente, por los considerados expertos en la materia. Esto ha creado un ambiente de confusión, e incluso de mitología, alrededor del ACR, lo cual ha conllevado a todo tipo de situaciones indeseables, desde la falta de aplicación, hasta el escepticismo sobre la fiabilidad de sus resultados, pasando por la mala praxis y la manipulación de resultados.

Terminología

Esta sección trata de aclarar un poco la confusión existente en el tema de gestión de riesgos. Para ello se presentan una serie de definiciones de los términos mas comúnmente usados.

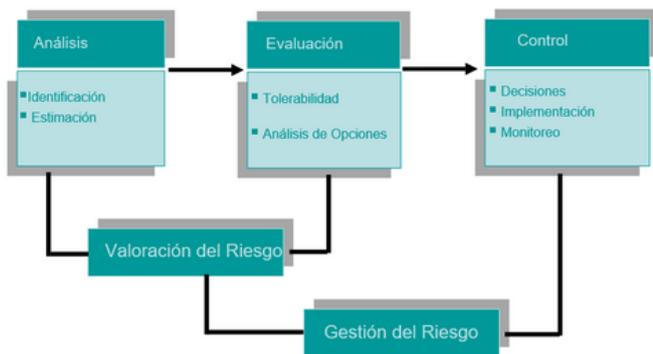
La primera confusión que es necesario aclarar es la diferencia entre riesgo y peligro. En este contexto, el peligro está referido a una fuente potencial de daño, o una situación con potencial de daño, mientras que el riesgo está definido por la combinación de la frecuencia de ocurrencia y las consecuencias de un evento peligroso específico.

La segunda distinción importante a tomar en cuenta es la diferencia entre análisis y valoración. La valoración de un riesgo implica la determinación de la magnitud, o importancia relativa de dicho riesgo. Análisis por otro lado, envuelve la división de un todo en sus partes, con lo cual el análisis de un riesgo conlleva la división del riesgo en sus distintos escenarios de accidente, incluyendo sus frecuencias y consecuencias específicas a cada escenario. Es obvio que la valoración del riesgo requiere de un análisis y evaluación de riesgos previa, de lo contrario no tendría sentido.

Una vez hecha la valoración de un riesgo, la siguiente etapa consiste en establecer las medidas de control, que no es más que un proceso de toma de decisiones para gestionar y/o reducir los riesgos, su implantación, y re-valoración periódica, usando los resultados de una valoración de riesgos como fuente de información.

El proceso completo desde el análisis del riesgo hasta el establecimiento de las medidas de control es lo que se conoce como gestión de riesgos. De forma tal que la gestión de riesgos no es mas que la aplicación sistemática de procedimientos, practicas, y políticas gerenciales a las tares de analizar, valorar y controlar los riesgos. La figura 1 pretende mostrar un esquema grafico del proceso de gestión de riesgos.

Figura N° 01. Valoración y Gestión de Riesgos



Que es un ACR?

¿Que entendemos entonces por un ACR? En realidad, un proceso formal de ACR trata de responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué puede salir mal?
- ¿Con que frecuencia?
- ¿Con que consecuencias?
- ¿Es aceptable el riesgo?

En este contexto, se puede definir un ACR como el proceso a través del cual se obtienen estimados de la posibilidad de fatalidades (bien dentro de los trabajadores de una instalación, o del público en general, o ambos).

Esta posibilidad de fatalidades se expresa a través de una serie de medidas de riesgo diferentes, pero relacionadas entre si. Así, para poder entender e interpretar de una forma completa el riesgo de una instalación determinada, se requiere la estimación y análisis de todas estas medidas de riesgo. Estas medidas son las siguientes:

Riesgo Individual Especifico de una Localización. Conocido por sus siglas en inglés LSIR (Location Specific Individual Risk). El LSIR provee una medida del peligro inherente asociado a distintas localizaciones geográficas dentro de una planta o instalación. El cálculo del LSIR está basado en la premisa de que cada localización geográfica considerada, está permanentemente habitada por un individuo. Típicamente, el LSIR es estimado en los puntos de una malla ortogonal que cubre el área de interés. Los riesgos estimados son presentados en forma de curvas o contornos de iso-riesgo de fácil comprensión. Dichos contornos de riesgo indican la magnitud potencial (o intensidad) del riesgo, pero el riesgo solo se materializa en una localización determinada, si hay personas presentes en la misma y por un tiempo suficiente.

LSIR solo incluye aquellas fuentes de riesgo que provienen de una localización fija, por lo tanto no incluye riesgos tales como transporte, u ocupacionales.

Riesgo Individual. Conocido por sus siglas en inglés IR(Individual Risk), o también IRPA (Individual Risk Per Annum). El IR se determina en una base de caso por caso para cada individuo que trabaja en una instalación. No obstante, en la practica no hay suficiente definición de los datos que determinan la exposición y las localizaciones en las cuales los individuos son expuestos, los cálculos del IR se efectúan para grupos representativos de trabajadores, antes que para cada individuo.

La contribución del proceso industrial al IR de cada grupo representativo de trabajadores se estima en base a una ponderación del tiempo de los valores del LSIR determinados en cada localización donde el grupo representativo pasará tiempo. Se consideran en este caso las contribuciones al riesgo de factores tales como el transporte y los riesgos ocupacionales. En aquellos casos en los que el personal permanece en la instalación durante sus horas libres, se contabiliza este riesgo adicional dentro del IR

Pérdida Potencial de Vidas. Conocido por sus siglas en inglés PLL (Potential Loss of Life). El PLL se deriva de los estimados del IR de los grupos representativos de trabajadores. El PLL para un grupo cualquiera se estima como el producto del IR del grupo y la cantidad de miembros del grupo. Cuando se utilizan turnos diurnos y nocturnos, ambos contribuyen al PLL. De igual forma se consideran las rotaciones.

El PLL puede ser evaluado en términos de fatalidades por año, peor también puede ser expresado en términos de fatalidades totales sobre la vida útil de diseño de la instalación. Cuando se requiere la conocer la diferencia entre dos opciones de diseño (por ejemplo como parte de un estudio de demostración de ALARP), la evaluación se hace normalmente tomando la vida Útil de la instalación debido a que esto facilita los cálculos de coste-beneficio.

Riesgo Social. Conocido por sus siglas en inglés SR (Societal Risk), o también F-N Curves (Cumulative Frequency vs. Number of Fatalities). Una curva F-N grafica la frecuencia acumulada (F) de los eventos que resultan en N o mas fatalidades, contra N. Debido a la forma en que se define la curva, el máximo valor de F corresponde al valor mas pequeño de N, y viceversa. Por lo tanto F es una función decreciente de N. La curva F-N provee información relativa a la distribución del riesgo entre eventos que resultan en cantidades pequeñas de fatalidades, y eventos que resultan en cantidades grandes de fatalidades.

Cálculo de las Medidas de Riesgo

Esta sección provee un breve resumen de los cálculos de riesgo llevados a cabo en un ACR típico. Es importante hacer notar que esta sección no aborda temas más complejos como por ejemplo análisis de efectos físicos (consecuencias), análisis de vulnerabilidad, etc.

A manera de advertencia, es importante mencionar que es indispensable definir claramente las medidas de riesgo a ser estimadas en un proceso de gestión de riesgos que incluye una evaluación cuantitativa de dichos riesgos. Cuando se comparan riesgos de distintas instalaciones, o distintas opciones de diseño, es esencial, para que la comparación tenga sentido, que los riesgos sean calculados en la misma base. Similarmente, si el proceso de gestión de riesgos utiliza lineamientos cuantitativos, incluyendo un criterio cuantitativo de tolerancia de riesgos, dichos lineamientos deben definir claramente las medidas de riesgo a utilizar, y el procedimiento de cálculo a usar para la estimación de las medidas que serán comparadas con el criterio de tolerancia. Si esto no se cumple, solo se creará confusión y resultados muy poco fiables.

Teniendo en mente lo dicho anteriormente, pasemos a dar una visión general de las bases de cálculo para la determinación de las distintas medidas de riesgo.

Eventos Iniciadores

Un ACR típico considera una gran cantidad de eventos iniciadores, cada uno de los cuales tiene el potencial de originar varios resultados posibles. Cada evento iniciador tiene una frecuencia asociada. Esta frecuencia puede ser un dato de entrada directa al análisis (por ejemplo, la frecuencia de ruptura de una tubería obtenida directamente de una base de datos apropiada), o puede a su vez provenir de un análisis previo, tal como un estudio de árbol de fallos.

Dentro de un ACR todas las frecuencias de los eventos iniciadores deben ser expresadas en una base de tiempo común, normalmente eventos por año.

Árbol de Eventos

Un evento iniciador cualquiera, siguiendo muchas vías distintas, a su vez puede crear muchos escenarios de accidentes distintos. Estos diversos escenarios y vías de ocurrencia se representan a través de un árbol de eventos.

El tamaño y la complejidad del árbol de eventos usados para representar los distintos escenarios dependen de la preferencia del analista. Así por ejemplo, el tamaño de la descarga y las condiciones meteorológicas durante la descarga, pueden ser tratados como nodos en el árbol de eventos (originando un gran árbol y menos eventos iniciadores), o alternativamente, pueden ser tratados de forma que originen múltiples eventos iniciadores (produciendo árboles mas pequeños y mayor cantidad de eventos iniciadores).

Típicamente, entre los nodos considerados en un árbol de eventos para un evento de descarga no tóxica, se incluyen los siguientes:

Detección de la descarga

Aislamiento de la descarga

Reducción de presión en el sistema (blowdown)

Ignición inmediata

Ignición retardada

Explosión

Los tres primeros nodos de la lista determinan el tamaño y duración de la descarga, y por lo tanto determinan la magnitud de las consecuencias. Las ultimas tres determinan el tipo de consecuencias que ocurrirán (dispersión segura, jet fire, flash fire, o explosión).

Cada punto final del árbol de eventos representa un resultado distinto originado por el evento iniciador, en otras palabras, representa un escenario de accidente distinto. A su vez cada punto final (escenario) tiene una frecuencia asociada, determinada por el producto de la frecuencia del evento iniciador y las diferentes probabilidades de los nodos que unidos dan origen al escenario en cuestión.

En cada nodo de un árbol de eventos, las probabilidades de las distintas ramas del árbol siempre suman uno. En consecuencia, la sumatoria de las frecuencias de todos los escenarios es siempre igual a la frecuencia del evento iniciador. En notación matemática este hecho se puede resumir así:

Frecuencia del evento iniciador i de n :

$$\phi_i$$

Probabilidad del resultado del árbol de eventos j de m :

$$\pi_j \left(\sum_{j=1}^{j=m} \pi_j = 1 \right)$$

Frecuencia del resultado del árbol de eventos j dado el el evento iniciador i :

$$f_{i,j} = \phi_i \times \pi_j$$

Probabilidad de Fatalidades

Cada escenario de accidente obtenido en el árbol de eventos está asociado a una consecuencia distinta. Estas consecuencias a su vez poseen diferentes probabilidades de causar fatalidades a personas situadas en lugares específicos con respecto a la localización del evento iniciador. El cálculo de las probabilidades de fatalidades se efectúa normalmente en dos etapas. Se utiliza en primer término un modelo matemático de efectos físicos para evaluar la medida correspondiente (por ejemplo, flujo de radiación térmica, o sobre-presión). La segunda etapa consiste en calcular la probabilidad de fatalidades en una localización específica.

Suponiendo que el evento i ocurre en la localización (x_i, y_i, z_i) , entonces para el resultado j^{th} del árbol de eventos y la localización objetivo k^{th} (x_k, y_k, z_k) , se puede definir una probabilidad de fatalidad $(p_{i,j,k})$, la cual representa la probabilidad que el resultado j del árbol de eventos para el evento iniciador i resultará en una fatalidad en la localización k . En general, se puede definir $p_{i,j,k}$ como una función de las localizaciones de la fuente y objetivo, del evento iniciador y del resultado del árbol de eventos, con lo cual: $p_{i,j,k} = \text{fat}(x_i, y_i, z_i, x_k, y_k, z_k, i, j)$

Potencial de Fatalidades Múltiples

La cantidad de fatalidades que pueden ocurrir en la localización objetivo k^{th} debido al evento iniciador i^{th} y al árbol de eventos j^{th} está dada por el producto de la probabilidad de fatalidades $p_{i,j,k}$ y la cantidad de personas presentes en la localización cuando el evento ocurre, llamémosle n_k . Por lo tanto, la cantidad de fatalidades en el objetivo k debido al resultado j siguiendo al evento iniciador i estará dada por $n_{i,j,k} = p_{i,j,k} \cdot n_k$. Y su contribución al riesgo estará dada por $r_{i,j,k} = f_{ij} \cdot n_{i,j,k} = f_{ij} \cdot p_{i,j,k} \cdot n_k$

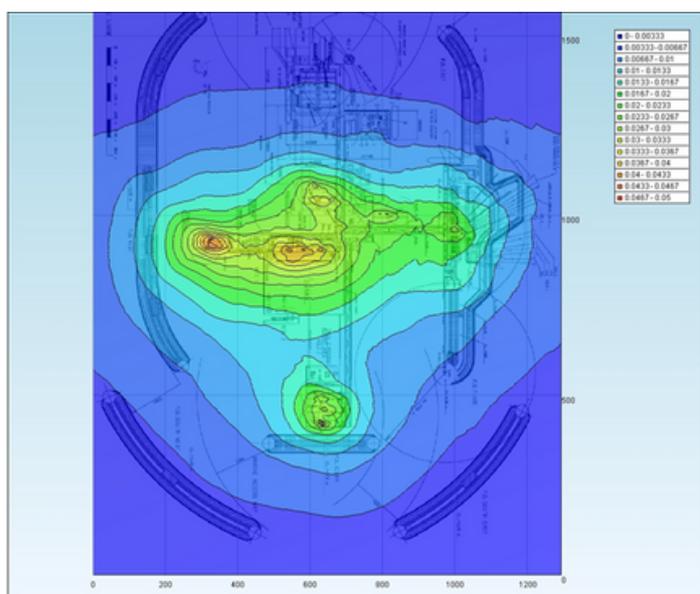
Medidas del Riesgo

Riesgo Individual Específico de una Localización (LSIR)

El LSIR se determina en todas las localizaciones objetivo que se requiera. En general se incluyen los dos puntos de la malla ortogonal de forma que sirvan de datos para el desarrollo de los contornos de iso-riesgo y de las localizaciones en donde los grupos representativos de trabajadores estarán situados. El LSIR se estima con respecto a un individuo imaginario en cada punto objetivo (ver figura 2), y n_k es por lo tanto igual a 1 para todo k . El LSIR en el punto (x_k, y_k) está definido por:

$$LSIR(x_k, y_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \phi_i \times \pi_j \times p_{i,j,k}$$

Figura 2. Ejemplo de un gráfico de contornos de LSIR



Riesgo Individual (IR)(IRPA)

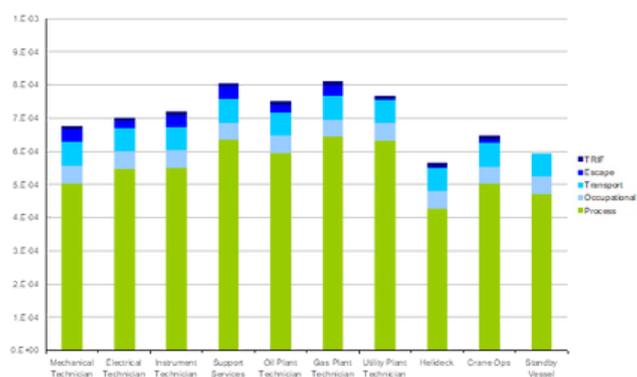
La contribución del proceso industrial al IRPA de cada grupo representativo de trabajadores se calcula como el promedio ponderado de los LSIRs en los sitios receptores en los cuales el grupo de trabajo estará presente. Si el tiempo, expresado como una fracción del año, que el grupo q , de un total de s grupos, pasa en la localización k se le denomina $w_{q,k}$ y la cantidad total de localizaciones objetivo está dado por n_t , entonces, la fracción de tiempo que el grupo q pasa en el sitio expuesto al riesgo está dado por (normalmente igual a 0.25 para un grupo que rota en tierra firme, y 0.5 para un grupo que rota en costa-afuera).

Por otro lado, la contribución del proceso al IRPA de dicho grupo estará dada por:

$$IR_{process}(q) = \sum_{k=1}^{k=n_t} w_{q,k} \times LSIR(x_k, y_k)$$

El IRPA total para el grupo estará dado por: $IR(q) = IR_{process}(q) + IR_{Transp.}(q) + IR_{ocupacional}(q)$ (ver figura N°03)

Figura N°03. Ejemplo de un gráfico de IRPA



Pérdida Potencial de Vidas (PLL)

La contribución al PLL del grupo q estará dada por:

$PLL(q) = IR(q) \times n_{pers,q} \times turno_q \times rotación_q$ Donde $n_{pers,q}$ es la cantidad de personas en el grupo q , $turno_q$ es la cantidad de turnos por día del grupo q , y $rotación_q$ es la cantidad de rotaciones del grupo q .

El PLL total en una base de frecuencia anual estará dado por $PLL_{annual} = \sum_{q=1}^{q=n_g} PLL(q)$

El PLL acumulado estará dado por $PLL_{acum.} = PLL_{anual} \times \text{Vida Útil de Diseño}$

Riesgo Social (Curvas F-N)

Para un conjunto de resultados potenciales de un evento, cada uno de los cuales tiene una frecuencia fr_i y una cantidad asociada de fatalidades nf_i , el par de datos necesarios para la construcción de la curva F-N están dados por

$$F = \sum_{\mu=1}^{\mu=n} fr_{\mu} | nf_{\mu} \geq N$$

La evaluación del par de datos fr_m, nf_m no es siempre simple. En aquellas circunstancias en las que varios grupos de trabajo pueden ser impactados por un solo evento, es aconsejable considerar la posibilidad de fatalidades simultaneas en múltiples grupos, dado que esto generara un resultado mas conservador. No obstante, normalmente en la practica no hay suficiente información para permitir este análisis.

La sección anterior sobre probabilidad de fatalidades nos permite calcular la frecuencia y cantidad de fatalidades en la localización k debidas al resultado j siguiendo al evento iniciador i, de la forma siguiente: $f_{i,j} = f_i \cdot p_j$ y $n_{i,j,k} = p_{i,j,k} \cdot n_k$ respectivamente. Considerando solamente un grupo de trabajadores a la vez, y separando los componentes de frecuencia y cantidad de fatalidades apropiadamente obtenemos: $f_{i,j,k,q} = f_i \cdot p_j \cdot w_{q,k} \cdot \text{turno}_q \cdot \text{rotación}_q$ y $n_{i,j,k,q} = p_{i,j,k} \cdot n_{pers,q}$

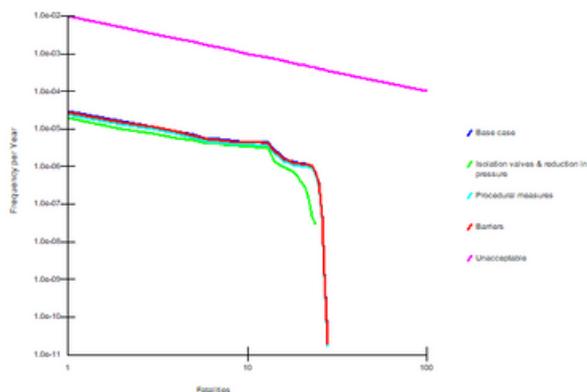
A partir de ahí $f_{i,j,k,q}$ y $n_{i,j,k,q}$ pueden ser sustituidos por fr_m, nf_m para estimar la curva F-N (ver figura 4 para un ejemplo)

El cálculo de las curvas F-N para el público se hace de una manera similar a lo establecido anteriormente.

Proceso de Elaboración de un Estudio ACR

Elaborar un estudio de ACR implica el manejo de una gran cantidad de datos y modelos con un alto grado de incertidumbre. Por ello, en general, los analistas de riesgos experimentados señalan como buena practica interpretar los resultados del riesgo en términos comparativos y no en términos absolutos.

Figura 4. Ejemplo de un gráfico de curva F-N



En algunas circunstancias, por ejemplo para demostrar cumplimiento con estándares basados en desempeño, establecimiento de prioridades en la determinación de medidas de mitigación costo-efectivas, y para comparar los riesgos contra un criterio de tolerancia, puede ser necesario interpretar los resultados del riesgo en términos absolutos, pero esto siempre se debe evitar, y cuando no exista otra opción, debe ser hecho con mucha precaución.

Ya hemos establecido que el riesgo asociado a un evento está definido como el producto de la posibilidad que dicho evento suceda y la magnitud (severidad) del resultado del evento. La posibilidad de que el evento suceda se define en términos de la frecuencia anual de su resultado, mientras que la magnitud del resultado se define como la cantidad de fatalidades causadas por el evento. El riesgo es por tanto el producto de estas dos cantidades y se expresa en fatalidades por año. Es importante tener siempre en mente que el riesgo calculado es lineal con respecto tanto a frecuencia como a cantidad de fatalidades, no obstante, la respuesta a estos eventos por parte del público y la prensa en general presenta una aversión significativa a accidentes que resultan en múltiples fatalidades. En consecuencia, eventos cuyo riesgo estimado es igual, pueden dar origen a reacciones o impactos en la reputación de la empresa muy diferentes por parte del público y la prensa.

Lo anterior indica a las claras que el riesgo va mucho más allá de ser el simple producto de frecuencia por consecuencias, es obvio que tiene un componente social muy cargado por los valores individuales, y además por el contexto específico donde se presenta el riesgo, todo lo cual nos hace concluir que el riesgo no es lo mismo para cada persona y depende de la percepción y aversión de cada individuo al riesgo. De igual forma, se puede decir que la aversión al riesgo está creciendo día a día avivada por los reguladores y las regulaciones y aún en mayor medida, por los medios.

La aversión al riesgo es un factor sumamente importante a la hora de hacer juicios sobre la tolerabilidad de los riesgos, y para tomar decisiones para su control, pero a su vez es un factor que no es fácil incluir, sino imposible, dentro del modelaje matemático para calcular el riesgo.

Teniendo en mente los aspectos antes mencionados, veamos cual es en la actualidad considerada como la mejor práctica para la elaboración de un estudio de ACR (para un esquema del proceso ver la figura 5).

Información

El primer aspecto a considerar dentro del proceso para llevar a cabo un ACR es el de contar con la información completa y actualizada necesaria para efectuar los cálculos. Si esto no se cumple no tiene ningún sentido proceder con el ACR, puesto que los resultados no serán fiables. La principal documentación requerida para la elaboración de un ACR es la siguiente:

- Legislación, regulaciones, códigos y especificaciones propias del país donde se encuentra la instalación a estudiar.
- Descripción de la instalación, equipo o sistema bajo estudio, incluyendo los P&ID, PFD y planos de planta.
- Descripción de las características de inflamabilidad, toxicidad, etc. de cada una de las sustancias usadas en el proceso.

- Base de datos a usar para la información de frecuencia de fallas de equipos, accidentes, incidentes, etc.
- Base de datos de las condiciones ambientales del área donde se encuentra la instalación bajo estudio.
- Base de datos especificando claramente la población afectada, tanto empleados, como terceros aposentados alrededor de la instalación, incluyendo planos de levantamiento poblacional.
- Criterio de tolerancia de riesgos del país en que se encuentra la instalación y/o de la empresa dueña de la instalación.

Preparación Previa

Una vez que se cuenta con la mejor información posible mencionada en el punto anterior, y con el fin de asegurar la calidad del estudio, es necesario efectuar una etapa de planeamiento. Esta etapa requiere desarrollar los siguientes pasos:

.Definir de forma clara y muy precisa el alcance del estudio y sus limitaciones, así como el propósito del mismo.

.Organizar un equipo de personal con conocimientos contrastados sobre la instalación (y su proceso) bajo estudio y también sobre la metodología de ACR

.Definir claramente los estándares y especificaciones que aplican tanto para el diseño, como para la operación de la instalación.

.Definir claramente los paquetes de software a usar para los cálculos de frecuencia, consecuencias y riesgo, y asegurar que la última versión de los mismos se encuentra disponible para el estudio.

.Definir claramente las suposiciones, criterios, etc. acordados para el estudio, y como serán usados los resultados del mismo.

- Definir de forma clara y precisa el tipo y extensión del estudio de ACR a ser aplicado.

Nota 1: El tipo y extensión del estudio de ACR deben ser proporcionales a la escala de los riesgos. Es apropiado considerar solo riesgo individual cuando los riesgos tienen el potencial de afectar solamente a individuos aislados, o a un grupo muy reducido de ellos. Similarmente, si los riesgos pueden afectar a mucha gente a la vez, se deberá estudiar, además del riesgo individual, el riesgo social.

Nota 2: El tipo y la extensión del estudio de ACR también dependerán de la etapa de vida en la cual se encuentra la instalación. Mientras menos avanzado esté el proyecto, menor cantidad de información disponible y menos exacta, en consecuencia, menor grado de detalle del estudio de ACR.

Elaboración del Estudio de ACR

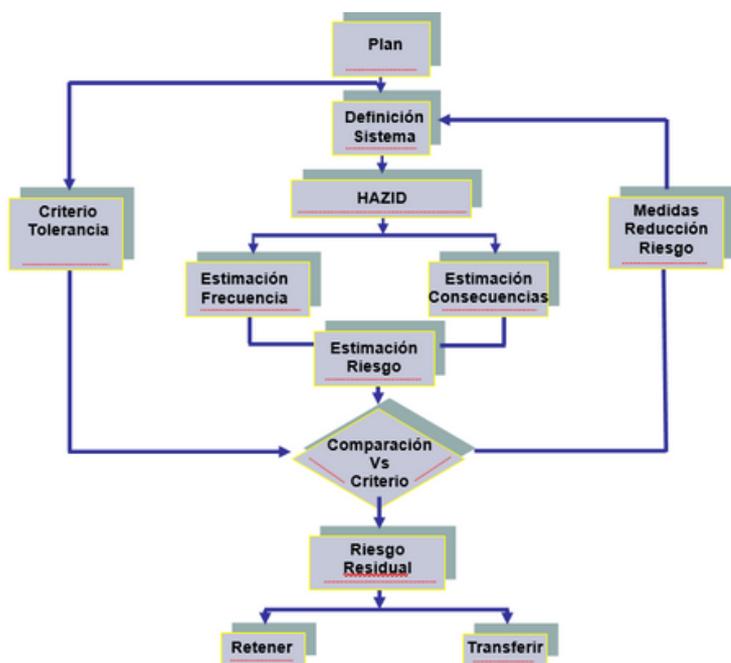
Ahora ya se puede proceder a elaborar el estudio de ACR. Esta etapa implica efectuar los siguientes pasos:

- Determinar la densidad poblacional tanto dentro de la instalación (personal propio), como en los alrededores de la misma (terceros).
- Desarrollar un estudio de HAZID para estudiar el proceso y sus sistemas de control y protección, de forma de identificar y analizar todos los peligros y eventos de liberación de sustancias peligrosas a la atmósfera.
- Usando la técnica de Árbol de Eventos (ETA) y a partir de los eventos de liberación de sustancias peligrosas identificados anteriormente, definir todos los posibles escenarios creíbles de accidente, tales como BLEVE, nubes tóxicas, nubes de sustancias inflamables, VCE, etc.

- Basados en la información del punto anterior, determinar la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los escenarios de accidente.
- Usando las ecuaciones Probit, determinar las dosis equivalentes de fatalidad para cada uno de los peligros (sobre-presión, radiación térmica y toxicidad).
- Modelar cada uno de los escenarios de accidente para cada dosis equivalente correspondiente, de forma de determinar el área de afectación producida por cada uno de ellos.
- Usando la información desarrollada, determinar el riesgo en términos de las medidas de riesgo mencionadas en secciones anteriores (LSIR, IRPA, Curvas F-N, y PLL).
- Realizar los análisis de sensibilidad necesarios para definir las incertidumbres existentes en el proceso del cálculo del riesgo y sus causas y asegurar la calidad y exactitud de los resultados.
- Realizar un análisis de la importancia de cada uno de los factores contribuyentes al riesgo y efectuar una jerarquización de los mismos.
- En la medida de lo posible, presentar los resultados gráficamente (ver figuras 2, 3, y 4), para las distintas medidas de riesgo LSIR, IRPA, y curvas F-N. Los resultados del PLL se deben presentar en forma de tabla.
- Documentar todas las suposiciones, información, modelos utilizados, y en general toda la metodología usada y las fuentes de donde provienen.

Hasta aquí se ha descrito como preparar un estudio típico de ACR. Para poder valorar esos riesgos y establecer medidas de control de los mismos, se debe proceder con la siguiente etapa descrita en la sección que sigue.

Figura 5. Esquema del proceso de gestión de riesgos.



Proceso de Valoración del Riesgo

Una vez determinadas las medidas del riesgo, y con el fin de demostrar que los mismos son tan bajos como razonablemente posible (ALARP), y cumplen con los criterios de tolerancia de riesgos del país en el que se encuentra la instalación bajo estudio, es necesario proceder a valorar dichos riesgos.

Al igual que el proceso de estimación de riesgos, el proceso de toma de decisiones que envuelve valorar los riesgos, también presenta una cierta incertidumbre. En este caso la incertidumbre está representada por el hecho de que la tolerancia de riesgos está siempre referida a la disposición (individual o de un grupo, sociedad, etc.) a vivir con ciertos riesgos, que son percibidos como aceptables y controlados, con el fin de obtener beneficios. La incertidumbre surge por el hecho de que, aunque en promedio un riesgo dado, puede ser mínimo, o tolerable, puede ocurrir que bajo ciertas circunstancias muy improbables exista una posibilidad de que dicho riesgo alcance un nivel intolerable. Esta posibilidad puede llegar a ser preocupante para quien toma las decisiones, y debe ser mantenida siempre en mente por el analista, especialmente en términos de como impacta la mitigación y distribución de los riesgos.

Para tratar de solventar esta incertidumbre, es necesario lograr que cualquiera sea la actividad peligrosa que está bajo estudio, ésta no imponga un nivel de riesgo que sea desproporcionado con respecto a los beneficios (económicos, sociales, etc.) obtenidos de dicha actividad. Adicionalmente, idealmente tales riesgos deberían estar equitativamente distribuidos entre la sociedad en proporción a los beneficios percibidos. En la práctica no es posible lograr esta distribución, pero si es posible tratar de establecer un criterio de tolerancia del riesgo que permita tanto al analista como a quienes toman las decisiones, determinar el nivel de aceptación y distribución de los riesgos. Este criterio de tolerancia debe constituir un marco de referencia para la toma de decisiones y debe ser lo mas flexible posible. Normalmente, esta conformado por tres bandas (ver figura 6), cada una de las cuales ofrece una indicación de lo siguiente:

- Cuando el riesgo es tan desproporcionadamente grande, o sus consecuencias son tan inaceptables, que deben ser rechazados.
- Cuando los riesgos son, o han sido reducidos a un nivel aceptable, de forma que no es necesario establecer medidas de control adicionales.
- Cuando el riesgo cae entre las dos bandas anteriormente mencionadas, es decir, ha sido reducido al nivel mas bajo posible en la practica, considerando los costes de las medidas de reducción y los beneficios que acarreará la actividad que los produce
- Cuando el riesgo es insignificante. En la práctica es utópico pensar en encontrar un riesgo que caiga en esta banda, por lo cual puede ser ignorado. Se menciona solamente para efectos de consistencia.

Por otro lado, el proceso de determinación de tolerancia, distribución y reducción adecuadas de los riesgos, debe estar apoyado en los principios fundamentales siguientes:

- i. Los riesgos nunca deben ser impuestos de forma innecesaria
- ii. Ninguna persona o comunidad de personas debe estar expuesto a una proporción injusta del riesgo.

Figura 6. Tolerancia de Riesgos



Proceso de Determinación de las Medidas de Control del Riesgo

Los principios y premisas establecidos anteriormente nos permiten sacar las conclusiones más adecuadas y razonables en cuanto a la valoración y por ende en cuanto a la tolerabilidad de los riesgos. Pero aun falta por cumplir un paso muy importante como lo es el de establecer las medidas de control.

El proceso de determinar las medidas de control del riesgo más adecuadas, es necesario tener en mente las preguntas que nos hicimos al principio de este artículo, a saber:

- Cuan seguro es suficientemente seguro?
- Cual es el precio adecuado a pagar por la seguridad?
- Cuáles son las opciones para reducir el riesgo?"
- Cuál es la solución óptima considerando el coste?"

Solamente una contestación clara y precisa de estas preguntas nos permite asegurar la utilización de medidas de control del riesgo óptimas, y por ende, realizar una gestión adecuada del riesgo. El enfoque tradicional para responder a estas preguntas ha sido el de añadir sistemas de protección para reducir el riesgo. Desafortunadamente, la experiencia obtenida a través de varios accidentes catastróficos ocurridos en el pasado ha demostrado que aun los sistemas de protección más elaborados y sofisticados pueden fallar y fallan. Este hecho ha llevado a una evolución del enfoque en el tema de reducción de riesgos, dirigiéndolo hacia el control del peligro en su fuente más que hacia el riesgo mismo.

En este sentido, las mejores prácticas en el tema de reducción de riesgos hoy en día requieren que se analicen en primer término las opciones para eliminar o reducir el peligro en su fuente llevando a cabo cambios fundamentales en el proceso industrial mismo. Se utilizan cuatro estrategias principales en este enfoque que pertenecen a los dominios de la Seguridad Intrínseca, a saber:

- Sustitución.** Reemplazar la sustancia peligrosa usada en el proceso por otra menos peligrosa
 - Minimización.** Usar menos cantidad de la sustancia peligrosa
 - Mitigación.** Reducir las condiciones de operación
 - Simplificación.** Eliminar etapas innecesarias
- La aplicación de estas estrategias reduce la frecuencia y/o consecuencias del peligro directamente en su fuente. Desafortunadamente, no siempre es posible lograr eliminar el peligro en su fuente a través de estas estrategias, o al menos reducirlo hasta un nivel tolerable.

Se impone entonces, la aplicación de sistemas de protección para reducir el riesgo. En este caso también se puede y debe aplicar las mismas estrategias de la Seguridad Intrínseca mencionadas anteriormente. Aun cuando los sistemas de protección no son inherentemente seguros en sí mismos, algunos son inherentemente más seguros que otros. Así por ejemplo, la protección de estructuras metálicas para soporte de equipos es inherentemente más seguro que el uso de sistemas de aspersion de agua con el mismo propósito. La tabla 1 muestra una categorización de sistemas de protección en términos de su robustez.

Tabla 1. Robustez del Sistema de Protección.

Tipo de Sistema de Protección	Robustez
Intrínsecamente Seguro	Muy Alta
Pasivo	Alta
Activo	Media
Procedimientos	Baja

Otro aspecto importante a tratar en el proceso de determinación de las medidas de reducción del riesgo es el de cuales medidas aplicar en cada caso dependiendo del nivel de tolerabilidad del riesgo, y el papel que juega el Análisis Coste-Beneficio (ACB) en este proceso. La tabla 2 presenta un resumen de este aspecto.

Tabla 2- Aplicación de Medidas de Control de Riesgos

Tolerabilidad	Medidas de Control
Región Intolerable	Riesgo debe ser reducido a cualquier costo usando medidas intrínsecamente seguras y sistemas de protección pasivos o activos. De otra forma la actividad debe ser prohibida.
Región ALARP	Riesgo debe ser reducido por medio de la incorporación de medidas de protección basadas en su costo-efectividad. Aplicación de ACB y ALARP
Región Tolerable	Reducción adicional del riesgo a través de medidas administrativas (procedimentales), y gestionar el mejoramiento continuo. Posible aplicación de ACB y ALARP.
Insignificante	No son necesarias medidas de control adicionales. Gestionar el mejoramiento continuo

Cuando sea necesario, es decir en aquellos casos en el riesgo se encuentra en la región de ALARP, o en la de riesgo tolerable, se debe aplicar un estudio de ACB para determinar las medidas de reducción del riesgo más costo-eficientes, teniendo en mente que un ACB no puede ser el único argumento para la toma de decisiones.

En muchos casos, la toma de decisiones sobre medidas de reducción, no requiere la aplicación de un ACB en toda regla, una simple comparación de los costes contra los beneficios puede ser suficiente.

Es importante tener en mente que el ACB no debe ser aplicado a aquellos riesgos que se encuentren en la región intolerable. En estos casos el riesgo simplemente tiene que ser reducido a cualquier coste, o de lo contrario la actividad debe cesar.

Por otro lado, las medidas administrativas, o procedimentales, solo deben ser consideradas cuando el riesgo se encuentre en las regiones de ALARP o de riesgo tolerable.

Una vez estudiados los riesgos y tomadas las medidas de control óptimas en la forma establecida hasta este momento, aun quedará siempre un riesgo remanente, puesto que es técnica y económicamente eliminar por completo todos los riesgos de una actividad cualquiera. Este riesgo remanente se conoce como riesgo residual (ver figura 5), y es el riesgo que o bien se retiene (auto-seguro), o se asegura con un tercero, es decir, se transfiere. Así pues se puede decir que el riesgo residual es aquel riesgo que queda remanente después de haber aplicado los debidos controles a los peligros que han sido identificados, cuantificados, analizados, comunicados y tolerados después de una valoración apropiada. En consecuencia, el riesgo residual incluye aquellos riesgos que:

- Han sido aceptados conscientemente
- Han sido identificados, pero han sido valorados erróneamente
- No han sido identificados

Documentación, Comunicación y Mejoramiento Continuo

Una vez cumplida esta etapa, y para asegurar la efectividad y aplicabilidad de los resultados obtenidos, es necesario que el estudio sea documentado y comunicado a todas las partes relacionadas de la alguna forma con la gestión de los riesgos.

La documentación del proceso debe ser actualizada de forma permanente durante toda la vida útil de la instalación bajo estudio. Esta actualización debe ser hecha en función de los cambios de todo tipo que se produzcan en la instalación, y también en función de los avances en las metodologías de cálculo, premisas, etc. del proceso mismo de la gestión de riesgos en general.

Así mismo, el estudio de los riesgos no tiene ningún valor práctico si no es comunicado debidamente, tanto a las audiencias internas a la instalación. Como a audiencias externas que puedan estar afectadas por el riesgo. El personal propio de la instalación (incluyendo contratistas y visitantes) debe conocer los riesgos y sus roles y acciones a tomar respecto de los mismos. Las audiencias externas incluyen el público en general afectado por los riesgos y las agencias gubernamentales, sobre todo aquellas que estarían involucradas en un caso de emergencia.

Por ultimo, con el fin de asegurar la sostenibilidad y mejoramiento continuo del proceso en el tiempo, es necesario establecer un sistema de mejoramiento continuo como el se esquematiza en la figura 7.

Figura 7. Esquema del proceso de mejoramiento continuo



Deficiencias en el Proceso de ACR

Un estudio realizado por el Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido (ver referencia No. 10), ha detectado una serie de deficiencias que se han cometido y se siguen cometiendo a través del tiempo, en la aplicación del ACR. Estas deficiencias son las que han contribuido de forma determinante a todo tipo de situaciones indeseables, desde la falta de aplicación, hasta el escepticismo sobre la fiabilidad de sus resultados, pasando por la mala praxis y la manipulación de resultados.

Para aquellos interesados en el tema es altamente recomendable hacer una revisión del informe de la referencia No. 10, no obstante, a continuación se presenta un resumen de las deficiencias más importantes en la opinión del autor:

- Manipular los resultados para justificar las decisiones deseadas
- No acoplar las medidas de reducción del riesgo a los peligros
- Usar modelos de cálculo y datos irreales, o poco precisos
- Ignorar la incertidumbre envuelta en el proceso del ACR
- No utilizar un equipo para llevar a cabo el análisis, ni involucrar personal con conocimiento práctico de la actividad, operación o instalación bajo estudio

Conclusiones.

Visto todo lo anterior, que podemos concluir acerca del rol del ACR en la gestión de riesgos? La primera conclusión que se viene a la mente es que el proceso de gestión de riesgos, apoyado en un adecuado proceso de ACR, es el punto de inicio para asegurar la integridad de las instalaciones y equipos y operaciones seguras.

También es evidente que el proceso de aplicación del ACR está menoscabado por una serie de deficiencias que comprometen seriamente la utilidad del mismo en la toma de decisiones, y han contribuido en forma definitiva a su pérdida de credibilidad. En consecuencia, uno de los roles mas importantes del ACR es el de asegurar la provisión de medidas del riesgo aceptables y creíbles, con el fin de reducir la incertidumbre propia del mismo, y permitir una toma de decisiones mas objetiva, como parte del proceso de gestión de riesgos.

El ACR es igualmente una herramienta sumamente importante para comparar opciones, dada su capacidad para identificar los principales elementos que contribuyen al riesgo, jerarquizarlos, y establecer la naturaleza e importancia de los mismos, y proveer información objetiva para determinar las medidas de reducción optimas. Todo esto permite que el ACR facilite la interpretación de los resultados técnicos de forma que puedan ser entendidos por quienes toman las decisiones y por el público en general. De nuevo, este hecho contribuye notoriamente al mejoramiento del sistema de gestión de riesgos.

Por ultimo, tal vez uno de los roles principales del ACR en la gestión de riesgos, ha sido el de apoyar el desplazamiento del enfoque del tratamiento de los riesgos desde una visión meramente de riesgos ocupacionales (manejo de lesiones, daños, etc), a este enfoque moderno de gerencia de riesgos con énfasis en los riesgos tecnológicos y sus impactos, y con un carácter altamente cuantitativo y predictivo (manejo de riesgo residual, tolerabilidad, etc.).

Referencias

- Crowl, D.A., and Louvar J.F, Chemical Process Safety: Fundamentals with applications, Prentice Hall, New Jersey, 1990
- Lees F. P, Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control, Edited by Sam Mannan, Butterworth-Heinemann Ltd, 2005, ISBN 0750675551
- Rodríguez, J.A; Preliminary Major Hazard Analysis of the New Eastern Refinery, The University of Sheffield, Sheffield (U.K.), 1992.
- J Spouge et al, A Guide to Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations, CMPT 1999, ISBN 1 870553 365
- AIChE/CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Second Edition, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 2000.
- BSI 8444-3, "Risk Management, Part 3: Guide to Risk Analysis of Technological Systems", British Standards, London, 1996
- Rodríguez, J. A., Aplicación de Criterios de Tolerancia de Riesgos y Costo-Beneficio en los Estudios de Análisis de Riesgos de la Industria Petrolera y Petroquímica Venezolana, ARPEL, México, 1991.
- HSE, Quantified Risk Assessment: Its Input to Decision Making. Health and Safety Executive, Her Majesty's Stationery Office, 1989.
- Carter, D.A. "The Scaled Risk Integral—a Simple Numerical Representation of Case Societal Risk for Land Use Planning in the Vicinity of Major Accident Hazards." 8th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Antwerp, 19–23 June 1995
- Gadd, S. et al, "Good Practice and Pitfalls in Risk Assessment", HSE Research Report 151, Sheffield (UK), 2003
- British Royal Society, Risk Assessment: A Group Study Report. British Royal Society, London, January 1983
- Nussey, C., Carter, D. A., and Cassidy, K. "The Application of Consequence Models in Risk Assessment: A Regulator's View." Proceedings International Conference and Workshop on Modelling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, New Orleans, September 26–29 1995. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- NORSOK Standard Z-013, "Risk and Emergency Preparedness Analysis", Norwegian Technology Center, Norway, 2001.
- Carter, D. A., et al, "Appropriate Risk Assessment Methods for Major Accident Establishments", The Institution of Chemical Engineers, Rugby, 2003.
- Hurst, N. W. et al, "Development and Application of a Risk Assessment Tool (RISKAT) in the Health and Safety Executive", HSE Technology Division, Bootle (UK), 1989
- White D. C. "Inherently Safe Design. A Common Sense Approach", Proceedings of Annual Symposium, Mary Kay O'Connor Process Safety Center, Texas A&M University, College Station (USA), 1999.
- AIChE/CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Second Edition with Worked Examples". Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992.
- IChemE, Nomenclature for Hazard and Risk Assessment in the Process Industries, 2nd Edition. The Institution of Chemical Engineers, UK, 1992
- Vrijling, J. K., Wessels, J.F.M., van Hengel, W., and Houben. R. J. "What Is Acceptable Risk?" Directoraat General Rijkswaterstaat Report No BSW 93-23

DESAFIOS Y RECOMPENSAS DE LA MATERNIDAD EN LA INDUSTRIA

Gestionar el equilibrio entre el rol de madre y las responsabilidades profesionales es una tarea compleja. En este espacio, AIChE Perú comparte las experiencias de mujeres destacadas del sector industrial, quienes han logrado sostener ambos roles en entornos altamente exigentes.

Leonardo Pillco Zevallos
Ingeniero Químico

La participación femenina en la industria peruana ha crecido de forma sostenida en los últimos años, impulsada por una mayor conciencia sobre la igualdad de género, políticas de gobierno y diversas iniciativas. Sin embargo, equilibrar la maternidad con el desarrollo profesional sigue siendo uno de los retos más significativos, aunque también ofrece recompensas profundas y transformadoras.

Retos con distintos matices

Los desafíos para ejercer la maternidad en la industria se presentan en múltiples formas y contextos. Persiste aún la idea estereotipada de que ser madre puede truncar el crecimiento profesional de una mujer. Esta creencia puede desanimar a muchas a dar ese paso.

Nina Valentin, consultora de análisis químico instrumental, nos comparte: **“Ser madre es compatible con seguir tus sueños y objetivos profesionales.”**

Hoy, muchas mujeres en posiciones de liderazgo demuestran que es posible avanzar profesionalmente mientras se transita la maternidad. Algunas compartieron cómo esta etapa, lejos de frenar sus aspiraciones, les permitió reversionar sus metas y adquirir nuevas herramientas como ingenieras para enfrentar los desafíos que vinieron con ella.

Autocuidado y bienestar: el primer paso

Silvia Espiritu, directora de Comunidad WINC y emprendedora, afirma: **“Lléname de bienestar para que también puedas compartirlo con los que amas.”**

El autocuidado es clave. Los cambios hormonales, emocionales y físicos de la maternidad son reales y deben ser asumidos desde la conciencia, no desde el sacrificio. Informarse, buscar apoyo profesional, practicar el autoconocimiento y reconocer la propia vulnerabilidad son pasos necesarios para una experiencia materna más saludable y plena.

En entornos laborales poco comprensivos, con prejuicios o comentarios malintencionados, es fundamental confiar en la propia sabiduría y rodearse de redes que refuercen la seguridad emocional. Ignorar los estigmas y tomar los consejos que edifican es una herramienta de resistencia y crecimiento.

El equilibrio entre roles: compromiso y red de apoyo

Janeth Zhender, consultora independiente en Energía y Minería nos dice: **“Ser madre y trabajar en el sector industrial es un compromiso constante que requiere dedicación 24 horas, 7 días de la semana.”**

La logística emocional y física de una madre no es ilimitada. Por ello, construir una red de apoyo —ya sea con vínculos familiares, amigos, o ayuda profesional remunerada— es vital para sostener ambos mundos.

Trabajar en una empresa que entienda y respalde la maternidad marca la diferencia. Habrá momentos en que la emergencia esté en la planta, y otros donde el centro de atención sea el hijo. Sentirse segura en ambos contextos permite a las mujeres cumplir con sus roles sin sacrificar su identidad como madres.

La maternidad como escuela de liderazgo

“La maternidad tiene un efecto humanizante; todo se reduce a lo esencial.”

Ser madre también transforma. Se aprende a priorizar, a enfocarse en lo verdaderamente importante, y a tomar decisiones con mayor empatía y conciencia de riesgo. Estas habilidades son altamente valoradas en entornos industriales, donde la resolución de problemas y el pensamiento estratégico son fundamentales.

Las empresas que incluyen madres ingenieras en sus equipos acceden a una perspectiva fresca, más humana y resiliente. Diversificar el pensamiento dentro de las organizaciones no solo mejora el clima laboral, también potencia los resultados.

Reflexiones finales

La maternidad en la industria no es una barrera, sino una oportunidad para reconfigurar el liderazgo desde una perspectiva más empática, consciente y resiliente. Las mujeres que transitan este camino demuestran que es posible construir una carrera sólida sin renunciar a su rol de madres. Para ello, es necesario contar con entornos laborales más humanos, políticas inclusivas y redes de apoyo genuinas. Reconocer el valor que aporta la experiencia materna al mundo profesional no solo es un acto de justicia, sino también una estrategia inteligente para el crecimiento sostenible del sector industrial.



Es momento de que más empresas se sumen al cambio: escuchemos, apoyemos y visibilicemos a las madres que están transformando la industria desde adentro.

SBE UTEC – IMPULSANDO LA BIOTECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN

SBE UTEC – Impulsando la Biotecnología y la Innovación

El capítulo estudiantil SBE UTEC de la Society for Biological Engineering (SBE) en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) agrupa a estudiantes, docentes y egresados comprometidos con el desarrollo de la biotecnología. A través de formación técnica, proyectos interdisciplinarios y colaboración con la industria, buscamos consolidarnos como un referente académico y profesional en bioingeniería a nivel nacional, promoviendo la investigación, innovación y la formación de futuros líderes en el sector biotecnológico.



Actividades destacadas 1er Trimestre 2025

Durante el primer trimestre de 2025, SBE UTEC impulsó diversas actividades centradas en biotecnología, innovación y formación técnica. Estas incluyeron Journal Clubs, talleres temáticos y charlas especializadas dentro de nuestras áreas académicas: Biomateriales e Ingeniería de Tejidos, Biología Sintética, Biología Computacional y Bioprocesos.

Ejemplos claves son nuestra participación en el congreso BioFutura 2025, donde ejecutamos un taller sobre bioplásticos. La colaboración con el capítulo IEEE EMBS UTEC, donde organizamos una charla técnica sobre la optimización del flujo de pacientes en hospitales post-COVID. Finalmente, promovimos el aprendizaje creativo a través de un taller de arte microbiológico para San Valentín, combinando microbiología con expresión artística y fomentando el interés en las ciencias biológicas. Las actividades destacadas de este periodo fueron:

SBE UTEC – IMPULSANDO LA BIOTECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN

SBE UTEC Journey:

Lanzamos la primera edición de SBE UTEC Journey, nuestra publicación oficial que compila artículos técnicos y reportes sobre proyectos destacados. Esta revista refleja los avances en bioingeniería y promueve el pensamiento crítico y la divulgación científica dentro de la comunidad universitaria.

Visita Técnica a HASSO GROUP:

Miembros de SBE UTEC realizaron una visita técnica a HASSO GROUP, empresa especializada en bioprocesos. Durante esta visita, se desarrolló el taller "Desarrollo de un bioproceso microbiano: E. coli modificada con GFP", donde se abordaron técnicas de cultivo, escalamiento y análisis de expresión en biorreactores, consolidando conocimientos en ingeniería de bioprocesos.



Regional Conference DARWIN x SBE UTEC:

Organizamos la conferencia regional DARWIN x SBE UTEC en colaboración con BioRiidl de la Universidad de Somaiya (India). Este evento reunió a investigadores nacionales e internacionales para discutir temas como biofertilizantes microbianos, biotecnología de microalgas, hidrogeles funcionalizados para remediación de metales pesados y estrategias de expresión de proteínas recombinantes en E. coli. Fue una oportunidad para promover el intercambio académico y analizar soluciones biotecnológicas ante desafíos ambientales globales.

¡No te pierdas nuestras novedades!

En los próximos meses, SBE UTEC organizará charlas especializadas en áreas académicas clave y lanzará la nueva área de Biomodelado y BIOMEMS. Estén atentos a nuestras convocatorias y actividades. Para mantenerse informado sobre nuestros eventos y oportunidades, síguenos en nuestras redes sociales.



TRANSFORMACIÓN CIENTÍFICA DESDE LAS AULAS: RESULTADOS DEL PROGRAMA K-12 DE AICHE PERÚ

Este año, el Programa K-12 de AICHe Perú ha dado pasos firmes en su misión de despertar vocaciones científicas desde edades tempranas, impactando a más de 350 estudiantes a través de seis módulos educativos implementados en regiones como Tacna, Cusco, Arequipa, Ica, Ayacucho, La Libertad, Loreto y Lambayeque. Detrás de este impacto hay un equipo de más de 35 voluntarios provenientes de Perú, México y España, de diversas carreras profesionales, unidos por una misma causa: acercar la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM) a niñas, niños y jóvenes de zonas urbanas y rurales, promoviendo el pensamiento crítico, la creatividad y la pasión por aprender.



Cada módulo representa un paso hacia un Perú más inclusivo, preparado y sostenible, donde la educación científica se convierte en herramienta de transformación social. Gracias al liderazgo regional de nuestros voluntarios, el programa se expande con fuerza y compromiso, acercando las ingenierías y las ciencias a nuevos rincones del país.



NUESTRA MISIÓN

Impulsamos el talento científico desde las aulas escolares a nivel nacional, acercando la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM) a nuevas generaciones mediante proyectos educativos innovadores, inclusivos y con impacto social.



NUESTRA VISIÓN

Ser el líder nacional en la formación de vocaciones científicas, inspirando a estudiantes escolares a través de programas STEM innovadores y de calidad que fomenten el pensamiento crítico y contribuyan al desarrollo sostenible de nuestras comunidades.

Creemos firmemente que el futuro de la ingeniería empieza hoy, y nos emociona seguir expandiendo esta red de inspiración y conocimiento. Queremos llegar a más niñas, niños y jóvenes para que descubran el fascinante mundo de las ciencias, y se animen a construir un futuro con propósito.



NUESTRA ¿Y TÚ, TE ANIMAS A SER PARTE DEL CAMBIO?

Si eres estudiante, profesional o simplemente tienes la pasión de enseñar e inspirar, únete a nosotros como voluntario o líder. Juntos, sigamos transformando vidas desde las aulas.

Edgard Gastelo, Ingeniero Químico colegiado (UNPRG), maestrando en Gestión Pública y Gobernabilidad. Especialista en IQBF, SST, ISO 17025, ISO 37001 y materiales peligrosos (MATPEL Niveles I y II). Es Funcionario de la GFBF-SUNAT y Director del Comité STEM – Programa K12 de AICHe. Con 6 años de experiencia en sectores público y privado. Gastelo se destaca por su capacidad para liderar equipos de trabajo educativos y laborales, lo cual se ve reflejado en los resultados positivos y reconocimientos otorgados por instituciones como la GFBF SUNAT, GERESA-DESA, Construcciones Emanuel SAC, LATERCER SAC, MAPFRE Perú, UNPRG y QUIMPETROL Perú SAC. Su misión es promover el interés por las disciplinas STEM en estudiantes de nivel escolar.



NUESTRA VISIÓN

Actividad	Nombre de la actividad	Fecha	Organizador
Webinar	Hidrógeno Verde	16.05.2025	AIChE Perú
Seminario	Intercambiadores de calor tubulares estandar. Diseño Termico y Modelador 3D	05.05.2025	AIChE Perú
Charla y networking	Impulsandi tu carera con AIChE:conecta,aprende y crece	16.05.2025	AIChE UNSAAC
Ponencia	Holistic design approach to acheve sustainability, dacarbonization and IEQ	13.05.2025	AIChE UNSAAC
Simposio	Simposio de ciencia espaciales	16.05.2025	AIChE UTEC
Seminario	Agua y medio ambiente	4, 5 y 6 junio del 2025	AIChE UNSA

Para mayor información contactar a: eventos@aiche.org.pe