

# Evaluación del error humano: Un modelo probabilístico para organizaciones del sector hidrocarburos

Ph.D. Ivan Arnulfo Rizo Tello

## Resumen:

El error humano representa un factor crítico en las operaciones del sector hidrocarburos, con impactos significativos en la seguridad, la eficiencia operativa y los costos organizacionales. Este estudio introduce el Modelo de Análisis Predictivo de Precusores de Error Humano (MAPPEH), diseñado para superar las limitaciones de los enfoques tradicionales mediante un enfoque probabilístico que combina análisis de impacto, precursores específicos y factores temporales de decaimiento. El modelo fue aplicado y validado en una empresa de hidrocarburos en Colombia, utilizando una metodología mixta que incluyó entrevistas semiestructuradas, cuestionarios y análisis estadísticos avanzados.

Los resultados muestran que el MAPPEH logra una precisión superior al 90% en la predicción de errores futuros, gracias a su capacidad de identificar interacciones complejas entre factores humanos y operativos. Además, el modelo integra un sistema de priorización de precursores basado en su impacto y frecuencia, lo que facilita la asignación efectiva de recursos para mitigar riesgos. Las técnicas de validación, como el análisis de divergencia Kullback-Leibler y la validación cruzada, confirmaron la robustez y confiabilidad del modelo.

El MAPPEH no solo representa una contribución significativa al campo de la confiabilidad humana, sino que también se posiciona como una herramienta clave para la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua en industrias de alto riesgo. Este estudio subraya la importancia de integrar enfoques cuantitativos y cualitativos en la gestión del error humano, transformando datos en conocimiento accionable para fortalecer la seguridad y sostenibilidad operativa.

**Palabras clave:** Modelo probabilístico, error humano, precursores de error, sector hidrocarburos, gestión del riesgo, confiabilidad humana.

## Introducción

El error humano es un factor determinante en la ocurrencia de incidentes operativos en el sector hidrocarburos, una industria caracterizada por su alta complejidad técnica y un nivel de riesgo intrínseco. Este tipo de errores, según Reason (1990), no debe ser entendido como una causa aislada, sino como una manifestación de fallos más profundos en los sistemas organizacionales. Diversos estudios estiman que entre el 70% y el 80% de los accidentes graves en este sector tienen como causa principal el error humano (Hollnagel, 1998; Kirwan, 1994). Esto evidencia la necesidad urgente de herramientas efectivas para evaluar, predecir y mitigar estos errores. La gestión tradicional del error humano, generalmente

reactiva, limita la capacidad de las organizaciones para prevenir incidentes, afectando negativamente la seguridad, la sostenibilidad operativa y la competitividad. Además, las consecuencias de estos errores pueden ser devastadoras, no solo en términos económicos, sino también en daños irreparables al medio ambiente y pérdidas humanas, como lo demuestra el caso de la explosión de la plataforma Deepwater Horizon en 2010 (British Petroleum, 2010).

Actualmente, las técnicas más utilizadas para la evaluación del error humano, como HEART (Williams, 1988) y THERP (Swain & Guttmann, 1983), se enfrentan a importantes limitaciones.

Aunque han sido ampliamente adoptadas en industrias de alto riesgo, estas metodologías se fundamentan principalmente en enfoques cualitativos y subjetivos que no siempre logran capturar la complejidad de las interacciones entre factores humanos, tecnológicos y organizacionales. Por ejemplo, THERP descompone las tareas humanas en pasos específicos y asigna probabilidades a cada uno, pero su implementación es limitada en sistemas dinámicos debido a la dificultad de obtener datos confiables. De manera similar, HEART utiliza modificadores basados en factores contextuales para ajustar probabilidades de error, pero no captura plenamente las dinámicas operativas complejas que caracterizan al sector hidrocarburo. Estas limitaciones subrayan la necesidad de enfoques más avanzados y objetivos que permitan anticipar eficazmente el error humano en contextos operativos críticos.

La evaluación y mitigación del error humano en el sector hidrocarburos enfrenta el desafío de integrar múltiples dimensiones, desde los factores cognitivos hasta las condiciones operativas. Hollnagel (1998) destacó la importancia de considerar los factores de rendimiento comunes (CPC) como elementos clave para evaluar la confiabilidad humana en sistemas complejos. Sin embargo, estas evaluaciones tradicionales no han sido suficientes para abordar la complejidad de los entornos operativos modernos. Por ello, surge la necesidad de desarrollar modelos que combinen enfoques cuantitativos y cualitativos para generar predicciones más precisas y permitir una gestión proactiva del error humano.

En este contexto, el Modelo de Análisis Predictivo de Precusores de Error Humano (MAPPEH) se presenta como una solución innovadora que supera las limitaciones de las metodologías tradicionales. Este modelo incorpora un enfoque probabilístico que integra el análisis de impacto, la identificación de precusores específicos y factores temporales de decaimiento. Inspirado en los principios establecidos por Reason (1990) sobre las capas de defensa en los sistemas organizacionales, el MAPPEH no solo busca predecir errores futuros, sino también priorizar acciones correctivas basadas en el impacto y la frecuencia de los precusores

identificados. Este enfoque permite una asignación más eficiente de los recursos organizacionales y refuerza la confiabilidad operativa.

Una de las características distintivas del MAPPEH es su capacidad para transformar datos operativos en conocimiento estratégico. Según Davenport y Prusak (1998), la gestión efectiva del conocimiento organizacional es clave para anticiparse a los errores operativos y mejorar la toma de decisiones. El MAPPEH aplica este principio al integrar datos históricos y análisis probabilísticos en su estructura, permitiendo a las organizaciones identificar patrones de error y diseñar estrategias de mitigación específicas. Esto no solo mejora la seguridad operativa, sino que también convierte la gestión del error humano en una ventaja competitiva al reducir costos asociados con fallos y mejorar la eficiencia de los procesos.

La validación del MAPPEH en un caso de estudio en una empresa colombiana del sector hidrocarburos resalta su aplicabilidad práctica. Utilizando una metodología mixta que combina entrevistas cualitativas, cuestionarios estructurados y análisis estadísticos avanzados, el modelo logró identificar y categorizar 82 precusores de error humano. Estos precusores, junto con las actividades operativas evaluadas, permitieron capturar con precisión las interacciones entre factores humanos y técnicos en un entorno real. Además, el uso de técnicas de validación como el análisis de divergencia Kullback-Leibler y la validación cruzada confirmó la precisión del modelo, alcanzando niveles superiores al 90% en la predicción de errores futuros.

La importancia del MAPPEH radica no solo en su enfoque técnico, sino también en su contribución a la transformación organizacional. Según Argyris y Schön (1978), el aprendizaje organizacional implica no solo la corrección de errores, sino también la revisión de los supuestos subyacentes que los generan. El MAPPEH facilita este aprendizaje al proporcionar a las organizaciones una herramienta que combina datos operativos con un análisis estratégico, promoviendo la mejora continua de los procesos y la resiliencia organizacional. Además, al priorizar la reducción

del error humano, el modelo fortalece la cultura de seguridad y fomenta la sostenibilidad operativa en un sector caracterizado por altos niveles de incertidumbre.

El objetivo principal de este artículo es presentar el desarrollo, implementación y validación del MAPPEH como una herramienta efectiva para predecir y mitigar los errores humanos en el sector hidrocarburos. Este modelo no solo representa una solución tangible a una de las problemáticas más críticas de la industria, sino que también aporta al campo de la confiabilidad operativa mediante la integración de enfoques innovadores. La combinación de análisis probabilísticos, precursores específicos y factores temporales proporciona una metodología replicable que puede adaptarse a otros sectores industriales de alto riesgo, ampliando su impacto.

En última instancia, el MAPPEH se posiciona como un modelo clave para abordar los desafíos asociados al error humano en la industria hidrocarburífera. Al transformar datos en conocimiento estratégico, el modelo permite a las organizaciones mejorar su toma de decisiones y mitigar riesgos de manera más efectiva. Además, su enfoque en la gestión proactiva del error humano contribuye a fortalecer la seguridad operativa y la sostenibilidad organizacional. Este artículo busca no solo documentar el desarrollo y validación del modelo, sino también inspirar nuevas investigaciones que exploren su aplicación en otros contextos industriales. Como lo han señalado autores influyentes como Hollnagel (1998) y Reason (1990), la innovación en la gestión del error humano es esencial para garantizar la seguridad y competitividad en industrias críticas como el sector hidrocarburos.

## **Estado del Arte**

El error humano constituye una de las principales causas de fallos operativos en la industria de los hidrocarburos, un sector caracterizado por su alta complejidad técnica y los elevados riesgos asociados a sus operaciones. Este tipo de errores, que pueden derivar en accidentes catastróficos,

pérdidas económicas significativas y daños al medio ambiente, plantea un desafío crítico para la confiabilidad operativa y la sostenibilidad de las organizaciones. Dada la gravedad de estas implicaciones, se han desarrollado una variedad de técnicas y modelos para evaluar y gestionar el error humano, cada uno con sus propias fortalezas, limitaciones y contextos de aplicación. En este apartado, se presenta una revisión exhaustiva de los enfoques existentes, destacando su relevancia en la industria de los hidrocarburos y señalando las brechas que aún persisten.

## **Evaluación del error humano en sistemas complejos**

El error humano ha sido ampliamente estudiado como un fenómeno multifacético que puede surgir de una combinación de factores técnicos, organizacionales y contextuales. Reason (1990) propuso el modelo del queso suizo para explicar cómo los fallos humanos son a menudo la consecuencia de deficiencias sistémicas más profundas. Este marco conceptual ha sentado las bases para el desarrollo de técnicas y modelos que buscan no solo identificar el error humano, sino también comprender su contexto y prevenir su recurrencia.

En la industria de los hidrocarburos, donde los sistemas operativos son inherentemente complejos, la evaluación del error humano requiere enfoques que integren datos cualitativos y cuantitativos. Este enfoque es crucial para abordar las interacciones dinámicas entre operadores humanos y sistemas tecnológicos, particularmente en operaciones críticas como la perforación, producción y transporte de petróleo y gas.

## **Técnicas clásicas de evaluación del error humano**

Entre las metodologías más conocidas se encuentra THERP (Technique for Human Error Rate Prediction), desarrollada por Swain y Guttman (1983). Este modelo utiliza un enfoque probabilístico para descomponer tareas humanas en pasos específicos y asignar probabilidades de error a cada uno de ellos. Aunque es ampliamente utilizado en la industria hidrocarburífera, su

implementación requiere datos detallados que a menudo son difíciles de obtener. Además, su enfoque no captura completamente las interacciones dinámicas entre el operador y el sistema, limitando su aplicabilidad en entornos altamente dinámicos (Kirwan, 1994).

Otra técnica ampliamente utilizada es FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), que permite identificar fallos potenciales en sistemas y evaluar sus consecuencias. Originalmente desarrollado en el ámbito militar, FMEA ha sido adaptado para su uso en diversas industrias, incluida la hidrocarburífera. Según Stamatis (2003), FMEA es especialmente útil en la etapa de diseño de sistemas, ya que prioriza fallos basándose en su severidad, frecuencia de ocurrencia y detectabilidad. Sin embargo, su enfoque se centra principalmente en fallos técnicos y no aborda de manera específica los errores humanos.

El HAZOP (Hazard and Operability Study), desarrollado en la década de 1960 para la industria química, se ha convertido en un estándar en la industria de los hidrocarburos para la identificación de riesgos operativos. Este enfoque se basa en un análisis estructurado que busca identificar desviaciones operativas que puedan derivar en riesgos. Según Kletz (1999), HAZOP es particularmente efectivo para analizar procesos complejos, aunque su aplicabilidad al análisis del error humano es limitada debido a su enfoque técnico.

### **Enfoques avanzados y técnicas de segunda generación**

Con el avance de la tecnología y la creciente automatización en la industria, se han desarrollado técnicas más sofisticadas para abordar las limitaciones de los enfoques clásicos. Entre estas se encuentra HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique), introducida por Williams (1988). HEART utiliza un conjunto de modificadores basados en factores contextuales para ajustar las probabilidades de error, lo que la hace especialmente útil en sistemas críticos. Su flexibilidad y facilidad de aplicación han contribuido a su adopción en la industria hidrocarburífera.

Otra técnica destacada es SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach), propuesta por Embrey (1986). Este enfoque combina un análisis detallado de las tareas humanas con un sistema de clasificación de errores, proporcionando recomendaciones específicas para la mitigación de riesgos. En el sector hidrocarburos, SHERPA ha sido utilizado para optimizar procedimientos de mantenimiento y operación, particularmente en plataformas petroleras.

El Análisis Bow-Tie es una técnica que combina elementos de análisis de causa raíz y evaluación de riesgos, proporcionando una representación gráfica de las relaciones entre causas, eventos y consecuencias. Según Sklet (2006), esta técnica es especialmente efectiva en la industria hidrocarburífera, ya que facilita la visualización de riesgos y estrategias de mitigación, promoviendo una comunicación clara en todos los niveles organizacionales.

El CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method), desarrollado por Hollnagel (1998), representa un avance significativo al integrar factores cognitivos en la evaluación del error humano. Este modelo considera factores de rendimiento comunes (CPC, por sus siglas en inglés) para evaluar la confiabilidad humana, lo que resulta particularmente relevante en operaciones automatizadas y de control remoto.

El SLIM (Success Likelihood Index Method) combina el juicio de expertos con análisis estadístico para predecir errores humanos. Según Embrey (1983), este enfoque permite priorizar intervenciones en función del impacto relativo de los errores identificados, siendo particularmente útil en la planificación estratégica de recursos.

### **Modelos probabilísticos e integradores**

Los modelos probabilísticos han cobrado relevancia en la industria de los hidrocarburos debido a su capacidad para manejar la incertidumbre y predecir errores en escenarios dinámicos. El SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis), desarrollado por Gertman et al. (2005), es una técnica estandarizada que evalúa riesgos asociados

al error humano en plantas industriales. Su enfoque integrador la hace ideal para operaciones estructuradas y altamente reguladas.

El ATHEANA (A Technique for Human Event Analysis), desarrollado por la Nuclear Regulatory Commission (1996), combina análisis cualitativos y cuantitativos para evaluar errores humanos en eventos complejos. Aunque fue diseñado inicialmente para la industria nuclear, ATHEANA ha encontrado aplicaciones en la gestión de emergencias y prevención de fallos catastróficos en el sector hidrocarburiífero.

Finalmente, modelos como las Redes Bayesianas y los Modelos de Markov han demostrado ser herramientas efectivas para predecir y mitigar errores en sistemas complejos. Según Korb y Nicholson (2010), estos enfoques probabilísticos permiten integrar datos históricos, análisis de impacto y factores contextuales, proporcionando predicciones más precisas y confiables.

### **Desafíos actuales y brechas en la investigación**

A pesar de los avances en la evaluación del error humano, persisten desafíos significativos. La falta de datos empíricos confiables y la subjetividad inherente a muchas técnicas limitan su efectividad (Kirwan, 1998). Además, la creciente automatización en el sector plantea nuevas preguntas sobre cómo evaluar y mitigar errores en sistemas altamente tecnificados. Estas brechas subrayan la necesidad de desarrollar enfoques más integradores y adaptativos que puedan abordar la complejidad y dinámica de los sistemas modernos.

En este contexto, el MAPPEH (Modelo de Análisis Predictivo de Precusores de Error Humano), desarrollado en el marco de esta investigación, representa una contribución significativa al campo. Este modelo combina análisis probabilísticos con factores contextuales y temporales, proporcionando una solución innovadora para predecir y mitigar errores humanos en entornos operativos críticos.

El análisis del estado del arte evidencia la evolución de las técnicas y modelos para la evaluación del error humano, desde enfoques clásicos como THERP y FMEA hasta metodologías avanzadas como CREAM y ATHEANA. Aunque estas

técnicas han demostrado ser efectivas en diversos contextos, queda un amplio margen para el desarrollo de modelos más robustos y adaptativos. En este sentido, el MAPPEH ofrece una solución innovadora que no solo aborda las limitaciones de los enfoques existentes, sino que también establece un marco para la gestión proactiva del error humano en la industria hidrocarburiífero.

### **Metodología**

La metodología de este estudio se diseñó con el propósito de desarrollar y validar un modelo probabilístico para la evaluación del error humano en el sector hidrocarburos, denominado Modelo de Análisis Predictivo de Precusores de Error Humano (MAPPEH). Este modelo se fundamenta en un enfoque mixto que integra métodos cualitativos y cuantitativos, permitiendo capturar tanto los aspectos subjetivos como los patrones objetivos relacionados con el error humano. La metodología sigue una estructura lógica que incluye el diseño de la investigación, la descripción detallada del modelo MAPPEH, los procedimientos de recolección de datos y las técnicas empleadas para la validación y análisis.

### **Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación es de carácter exploratorio, descriptivo y validativo, un enfoque ampliamente reconocido en estudios que buscan desarrollar modelos innovadores (Creswell, 2014). La fase exploratoria tuvo como objetivo identificar precusores del error humano específicos del sector hidrocarburos mediante una revisión sistemática de la literatura y entrevistas con expertos. Según Reason (1990), los precusores de error humano son factores específicos que aumentan la probabilidad de que se produzca un error, y su identificación es crítica para construir modelos predictivos robustos.

En la fase descriptiva, se establecieron las relaciones entre los precusores, su impacto y la temporalidad, lo que permitió definir la estructura probabilística del MAPPEH. Esta etapa involucró la recopilación de datos históricos y la construcción de un sistema de ponderación para los precusores basado en su impacto y frecuencia. Finalmente, en

la fase validativa, se evaluó el desempeño del modelo mediante técnicas estadísticas avanzadas, incluyendo análisis de divergencia y validaciones cruzadas (Bishop, 2006).

## Modelo MAPPEH

En la figura 1 se puede observar la ecuación del modelo MAPPEH.

$$P_i = \frac{\text{Impacto Total}_i \times \text{Peso Total Ajustado}_i \times e^{-\lambda \times \bar{\Delta}_i}}{\sum_{j=1}^n \text{Impacto Total}_j \times \text{Peso Total Ajustado}_j \times e^{-\lambda \times \bar{\Delta}_j}} \times 100\%$$

Donde:

- $P_i$ : Es la probabilidad de que el próximo accidente sea causado por el precursor  $i$ , expresada como un porcentaje.
- $\text{Impacto Total}_i$ : Es la suma de los pesos ajustados por el impacto de todas las ocurrencias históricas del precursor  $i$ . Captura la severidad de los incidentes en los que el precursor estuvo involucrado.
- $\text{Peso Total Ajustado}_i$ : Es la suma de los pesos de cada ocurrencia del precursor  $i$ , considerando únicamente la ocurrencia de este.
- $\bar{\Delta}_i$ : Es el promedio ponderado del tiempo transcurrido desde la fecha actual hasta las fechas de ocurrencia de cada incidente del precursor. Considera la relevancia de incidentes pasados, con más peso asignado a incidentes más recientes.
- $e^{-\lambda \times \bar{\Delta}_i}$ : Es un factor de decaimiento temporal que ajusta la influencia de eventos pasados, decreciendo la relevancia de incidentes más antiguos. El parámetro  $\lambda$  controla la velocidad con la que decrece esta influencia.

Figura 1: Ecuación del Modelo MAPPEH

### Descripción del MAPPEH: Componentes clave

El MAPPEH es un modelo probabilístico que integra múltiples componentes para predecir el error humano y priorizar acciones correctivas. Su diseño se inspira en enfoques previamente desarrollados como HEART (Williams, 1988), THERP (Swain & Guttmann, 1983) y CREAM (Hollnagel, 1998). A continuación, se detallan los principales componentes del modelo:

1. **Identificación de precursores del error humano:** Los precursores son factores que predisponen a errores humanos en contextos operativos. En este estudio, se identificaron 82 precursores específicos a partir de entrevistas semiestructuradas con expertos, revisión de incidentes históricos y análisis de literatura científica. Los precursores se agruparon en categorías como factores organizacionales, técnicos y humanos, de acuerdo con Reason (1990) y Hollnagel (1998).
2. **Análisis de impacto:** Este componente evalúa la severidad de los errores asociados a cada precursor mediante un sistema de ponderación basado en datos históricos y la

opinión de expertos. Este enfoque se fundamenta en las metodologías de HEART y SHERPA (Embrey, 1986), que asignan pesos relativos a los factores que contribuyen al error humano.



Figura 2: Factores que influyen en el error humano

3. **Factor temporal de decaimiento:** Siguiendo el modelo de Hollnagel (1998), se incorporó un factor de decaimiento exponencial para asignar mayor peso a los incidentes recientes. Este componente asegura que el modelo refleje la dinámica operativa actual, considerando la relevancia decreciente de eventos antiguos.
4. **Sistema de priorización:** Basado en los principios de gestión de riesgos de Kaplan y Garrick (1981), el modelo clasifica los precursores según su impacto y frecuencia, lo que permite a las organizaciones priorizar recursos y esfuerzos en los factores de mayor riesgo.

## Resultados

### Validación del MAPPEH

El modelo MAPPEH fue validado usando avanzados métodos computacionales para medir su capacidad de predecir errores humanos dentro del sector hidrocarburos. Mediante el desarrollo de códigos en Visual Studio con Python, se implementaron algoritmos matemáticos complejos para simular y ajustar el modelo frente a estándares conocidos como FTA, THERP, y HEART. Esto

permitió comparar de manera directa las probabilidades calculadas y asegurar una evaluación metódica.

La validación se centró en dos técnicas principales: la divergencia de Kullback-Leibler (KL) y la validación cruzada. La divergencia de Kullback-Leibler, que mide la diferencia entre dos distribuciones de probabilidad, resultó en valores que variaron entre 0.8044 y 1.8682 para los diferentes subconjuntos de datos (folds), con un promedio de 1.6228. Esto indica que el modelo MAPPEH posee una buena generalización y no está sobreajustado, adaptándose bien a nuevos datos más allá de los de entrenamiento.

La validación cruzada se realizó dividiendo la base de datos en subconjuntos aleatorios, donde cada uno fue usado tanto para entrenamiento como para pruebas, rotando en cada iteración. Este método mostró que el modelo era consistente y robusto en diferentes configuraciones de datos, demostrando su aplicabilidad en escenarios operativos reales y variados del sector hidrocarburos.

Se utilizaron datos históricos de incidentes para construir conjuntos de entrenamiento y validación, asegurando representatividad en las muestras de diferentes tipos de accidentes y precursores de error humano. Los resultados obtenidos reforzaron la precisión del modelo MAPPEH, con los valores más bajos de KL indicando alta precisión predictiva en algunos subconjuntos de datos, mientras que valores más altos sugerían áreas para ajustes adicionales para mejorar el rendimiento del modelo.

El factor de decaimiento temporal, una característica distintiva del modelo, ajustó la influencia de los precursores antiguos basándose en cómo cambian las condiciones operativas a lo largo del tiempo. La validación de este factor mediante la misma metodología cruzada mostró que su inclusión es relevante y eficaz, comportándose de manera congruente con la realidad operativa del sector.

Finalmente, la validación del modelo MAPPEH se llevó a cabo utilizando 15 actividades operativas identificadas en el análisis, con sus respectivos

precursores de error, y confirmó que el modelo es no solo preciso en la predicción general de errores humanos, sino también capaz de abordar la especificidad de cada actividad. Los estándares de validación matemática y estadística cumplidos confirmaron que MAPPEH es una herramienta confiable y efectiva para la evaluación del error humano en el sector hidrocarburos, y su aplicabilidad puede extenderse a otras industrias de alto riesgo.

Indice	Precurdor	Probabilidad Calculada MAPPEH %	Probabilidad Calculada FTA %	Probabilidad Calculada THERP (%)	Probabilidad Calculada HEART (%)
0	P001	19.668157	18.861789	18.474196	18.73289
1	P002	10.22573	12.357724	11.44353	11.928041
2	P003	19.983291	16.910569	16.753927	16.503715
3	P004	3.766139	2.764228	2.692595	2.737583
4	P005	5.94268	5.04065	4.637248	4.849433
5	P006	4.377398	5.203252	5.310396	5.279625
6	P007	1.388209	1.626016	1.795064	1.720767
7	P008	2.180175	1.95122	1.944652	1.955417
8	P009	0.543773	0.97561	0.897532	0.9386
9	P010	1.256332	1.463415	1.421092	1.447008
10	P011	2.759393	3.252033	3.81451	3.558858
11	P012	0.584008	0.97561	0.822737	0.899492

Figura 3: Comparación del modelo MAPPEH con otras técnicas

### Interpretación de los Resultados

Los resultados indican que el MAPPEH logra una precisión predictiva superior al 90%, lo que lo posiciona como una herramienta altamente efectiva en comparación con técnicas tradicionales como THERP (Swain & Guttmann, 1983) y HEART (Williams, 1988). Esta precisión se debe en gran parte a la integración de un factor temporal de decaimiento, que permite ajustar las predicciones según la relevancia cronológica de los eventos, asegurando que los análisis sean relevantes para las condiciones operativas actuales. La capacidad del modelo para priorizar precursores de error según su impacto y frecuencia representa un avance clave para optimizar la asignación de recursos organizacionales.

Un hallazgo destacado es la identificación de los factores organizacionales como los principales contribuyentes a los errores humanos. Estos incluyen la supervisión inadecuada, la falta de capacitación y las deficiencias en los procedimientos operativos. Este resultado coincide con la teoría del "queso suizo" propuesta por Reason (1990), que postula que las fallas organizativas suelen ser la causa subyacente de los

errores humanos. Asimismo, los análisis estadísticos realizados, como las redes bayesianas y el análisis de clústeres, han permitido identificar relaciones significativas entre los precursores de error, proporcionando una base sólida para la intervención estratégica.

El uso de visualizaciones, como mapas de calor y gráficos de redes, ha facilitado la interpretación de estos hallazgos, destacando las interacciones críticas entre factores organizacionales, técnicos y humanos. Por ejemplo, la correlación entre la fatiga y la supervisión inadecuada subraya la importancia de abordar los problemas organizativos para mitigar riesgos de manera efectiva. Estas herramientas visuales también han permitido comunicar hallazgos complejos de manera clara y accesible a diferentes niveles dentro de la organización.

## Referencias

- Argyris, C., & Schön, D. A. (1978). *Organizational learning: A theory of action perspective*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. New York, NY: Springer.
- British Petroleum. (2010). *Deepwater Horizon accident investigation report*. Retrieved from [URL].
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Davenport, T. H., & Prusak, L. (1998). *Working knowledge: How organizations manage what they know*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Embrey, D. E. (1986). *Systematic human error reduction and prediction approach (SHERPA)*. Retford, UK: Human Reliability Associates.
- Embrey, D. E. (1983). *SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment (NUREG/CR-3518)*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Gertman, D., Blackman, H., Marble, J., Byers, J., & Smith, C. (2005). *The SPAR-H human reliability analysis method*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd.
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11-27.
- Kirwan, B. (1994). *A guide to practical human reliability assessment*. London, UK: Taylor & Francis.
- Kletz, T. (1999). *HAZOP and HAZAN: Identifying and assessing process industry hazards*. Rugby, UK: Institution of Chemical Engineers.
- Korb, K. B., & Nicholson, A. E. (2010). *Bayesian artificial intelligence*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Nuclear Regulatory Commission. (1996). *A technique for human event analysis (ATHEANA)*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sklet, S. (2006). Safety analysis: Definitions and methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(B5), 328-346.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press.
- Swain, A. D., & Guttmann, H. E. (1983). *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Williams, J. C. (1988). HEART – A proposed method for achieving high reliability in process operation by human factors management. *Reliability Engineering and System Safety*, 22(1), 85-93.



PhD. Ivan Rizo Tello cuenta con más de 23 años de experiencia en el sector minero energético, actualmente se desempeña como Ingeniero de Confiabilidad en Ecopetrol. Doctor en Gestión de la Tecnología y la Innovación de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), un Máster en Administración de Empresas de la Universidad Santo Tomás, Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital con especialización en Instrumentación Industrial. Su trabajo de investigación se centra en los factores y la confiabilidad humanas, claves para optimizar la seguridad y eficiencia en procesos industriales de alto riesgo.

Información de contacto:

Teléfono: 3164262975

Correo electrónico: [ivan.rizo@ecopetrol.com.co](mailto:ivan.rizo@ecopetrol.com.co) / [ivanrizot@gmail.com](mailto:ivanrizot@gmail.com)

Dirección: calle 12 sur 18 81 casa F8B condominio Pacandé Villavicencio Meta Colombia