

IA en la Gestión del Riesgo Operacional en O&G: Capas de Protección, Confiabilidad y Hoja de Ruta para la Adopción de IA

Darío Hernando Becerra - Senior Industry Consultant
HEXAGON ALI - Bogotá, Colombia

Resumen

Presentar los conceptos generales de la Confiabilidad Operacional en sus diferentes niveles con las herramientas y procesos que las respaldan. También se explican las diferentes etapas en la evolución de la automatización de flujos de trabajo, pasando por la IA generativa hasta la IA agéntica, para finalmente proponer la escogencia de la más adecuada para cada tipo de capa de protección en la gestión del riesgo considerando la madurez digital y la disponibilidad de la información. Este documento presenta conceptos y lineamientos generales para facilitar la adopción de modelos digitales que desbloqueen el poder de la información habilitando la implementación de la IA en instalaciones industriales para mejorar la gestión de riesgo operacional. Al final se presentan varios ejemplos y conclusiones sobre la adopción de la IA en la gestión de activos industriales, así como la mejora en su desempeño.

1. Retos actuales en la gestión de activos

La industria O&G enfrenta volatilidad de precios, compromisos de sostenibilidad, costos de producción, tensiones geopolíticas, relevo generacional y ciberseguridad IT/OT. Estas presiones demandan mejorar confiabilidad y control del riesgo operacional apalancando datos y analítica avanzada.

1.1. Volatilidad política y económica

En medio de la profunda transformación socio política en la que los organismos multilaterales tienen cada vez menos relevancia y capacidad

de maniobra para mantener el orden mundial, el sector energético, y en particular la industria de O&G, enfrentan una mayor capacidad de adaptación a las nuevas condiciones de mercado en las cuales la ventaja estará del lado de quienes consigan responder con mayor agilidad y haciendo uso más eficiente de la información.

1.2. Relevo generacional

La generación del *baby boom* empieza a ser relevada por una población decreciente de fuerza laboral cada vez más volátil y con motivaciones cambiantes. El conocimiento que antes residía en la competencia de cada colaborador ahora debe capturarse como un activo de la empresa, como un activo disponible para toda la organización. La competitividad y capacidad de adaptarse a los cambios y nuevos retos dependerá de la habilidad de digitalizar el conocimiento.

1.3. Compromisos en sostenibilidad

La suma de tener comunidades más atentas y sensibles al impacto de la industria, en especial de la petrolera, y la velocidad con la que han avanzado las telecomunicaciones y las redes sociales, hace que cualquier evento afectando al medio ambiente o a las comunidades sea mucho más impactante en las compañías operadoras. Además del efecto reputacional, también hay enormes consecuencias económicas, e incluso penales para los directivos de las empresas.

1.4. Ciberseguridad IT / OT

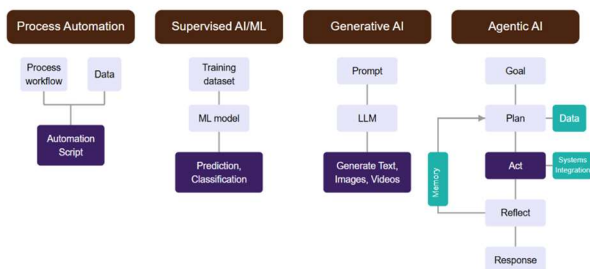
Los avances en telecomunicaciones traen de la mano nuevas vulnerabilidades operativas. Un caso que tomó por sorpresa a todo el mundo fue el hackeo de la planta de generación eléctrica en Kiev, Ucrania en 2016, en que el sistema de

control básico de proceso fue vulnerado remotamente a través de un software de control industrial. Es muy importante tener sistemas de vigilancia de la infraestructura informática, identificando incluso variaciones en el desempeño de las redes que puedan ser un indicio de una eventual violación al sistema. Aquí la IA juega un papel clave, sumada a las rutinas automatizadas para protocolos de pruebas.

2. Evolución de la IA

La evolución va desde automatización de tareas repetitivas y flujos de aprobación, pasando por aprendizaje supervisado para clasificación y predicción, hasta IA generativa y finalmente IA agéntica orientada a resolución de problemas más complejos que requieren una planificación, manejo de recursos y ajuste permanente de la estrategia que la propia IA gestiona. La elección depende de criticidad del proceso, complejidad analítica, madurez digital y costo del error.

Figura I. Evolución de la IA



2.1. Automatización de tareas de baja complejidad.

Aplicación directa sobre casos con datos disponibles basada en rutinas predefinidas para contextos de poca o nula variabilidad. Hay herramientas disponibles en aplicaciones muy populares desde hace varias décadas (e.g. macros de Excel 5.0 año 1993), pero en muchos casos no se aprovecharon por falta de datos contextualizados y claros procesos de trabajo. Se tiende a confundir a la IA con procesos de

automatización que estuvieron disponibles con simples algoritmos hace mucho tiempo.

2.2. Supervisada

La IA entrenada bajo un modelo con límites definidos demanda una enorme cantidad de información y experiencias para poder generar patrones, mientras los resultados son evaluados durante el proceso de entrenamiento. Tampoco es realmente algo nuevo puesto que se basa en modelos estadísticos tales como los *clusters* (clasificación por categorías para generar modelos basados en patrones con resultados predecibles). Lo que sí es novedoso es que la capacidad de procesamiento disponible hoy día.

2.3. IA Generativa

Produce contenidos como textos, imágenes y presentaciones a partir de modelos estadísticos con alta demanda de procesamiento de datos, tal como *Large Language Model* – LLM. Algunos ejemplos y precursores notables son: Asistente para servicio al cliente de AOL en 2001; Clippy de Office en el 97; Apple con su asistente Siri en 2011 y Chat GPT de OpenAI lanza comercialmente en 2022 siendo el hito más disruptivo en esta tecnología.

2.4. IA Agéntica

Autogestionada para estructurar el trabajo tomando parámetros del entorno y ajustar los resultados que ella misma puede evaluar. Puede delegar en otros agentes algunas tareas y toma decisiones en entornos cambiantes e inciertos porque evalúa el desempeño en tiempo real al retroalimentarse constantemente. Es la más compleja y costosa.

3. Gestión del Riesgo Operacional

Partiendo de procesos de valoración de riesgos cualitativos (HAZID / HAZOP), semi (LOPA) y cuantitativos (PHAST), se determinan los niveles de protección para los escenarios más críticos de una instalación industrial para operar

en niveles de riesgo tan bajos como sean razonablemente practicables (ALARP).

Las probabilidades de ocurrencia normalmente no se monitorean en tiempo real dada la gran cantidad de información y cálculos requeridos; aquí la IA abre grandes oportunidades en para hacer ajustes que garanticen la operación dentro de los límites de riesgo aceptables y con costos óptimos. En la medida que se digitalizan más datos de campo, más importante se hace contar con sistemas transversales bien estructurados que faciliten su análisis mediante rutinas, algoritmos y agentes inteligentes. Contar con una hoja de ruta y estrategia de implementación desde el principio es un factor clave de éxito para el aprovechamiento de la IA.

La figura II ilustra las diversas capas de control en su orden de jerarquía y los controles típicos para los cuales vamos a considerar el uso de la IA. En el nivel más básico se encuentran los controles manuales y se va avanzando hacia arriba con más automatización y sistema de respuesta automáticos que son más reactivos a las desviaciones del proceso.

Figura II. Contextualización de datos y gemelo digital

Reactivo	Evacuación	Manejo de Incidentes	Preparación para Emergencias
	Protección Física / Límites operativos	Monitoreo de excursiones	Inspecciones
	Disparos / Activación SIS / Paro emergencia	Desempeño IPL	Pruebas funcionales
	Alarmas e intervención del Operador	Alarmas	Rangos operativos
Proactivo	BPCS / Lazos de control	Monitoreo de lazos	Sintonía / diagnóstico
	Disciplina operativa / Procedimientos	Gestión de procedimientos	Ejecución de procedimientos

3.1. Capas de protección y sus niveles de digitalización

En el nivel más básico se encuentran los procedimientos normalmente ejecutados de manera manual y con registros en papel. La digitalización de tales registros permite ajustar los tiempos de ejecución mediante algoritmos que corrijan la capacidad real de los equipos e

incluso discriminando los tiempos estimados y precauciones necesarias en función del contexto operacional y cuadrillas programadas.

Por encima de los controles manuales, se encuentran los sistemas automáticos de control de proceso, tales como SCADA, BPCS y PLC, que progresivamente vienen integrando cada vez más los registros de sus historiadores en sistemas que contextualizan tal información para poderla analizar y efectuar cálculos de forma automática, donde los agentes de IA sugieren mejoras y ajustes en la sintonía en los lazos de control y eventualmente adaptarlos a diversos estados operativos de la planta. Por ejemplo, manejar transiciones como arranques de planta o ajustes en la capacidad de respuesta a manejo de diferentes tipos o dietas de crudos.

Luego vienen los sistemas de alarmas y paradas de planta o unidad a discreción del operador. Allí la digitalización y monitoreo de eventos también permite optimizar mediante el uso de asistentes y algoritmos de la IA los ajustes y parametrización de los niveles establecidos para las alarmas de forma que estén activas las realmente relevantes, eliminando las alertas espurias y las molestas.

Luego vienen las funciones instrumentadas de seguridad (SIS-LOPA) que deben tomar acción automáticamente cuando las tres anteriores no han alcanzado a anticipar o controlar un evento no deseado siendo así la última línea de defensa antes de la ocurrencia de un daño o afectación inaceptable para la organización. Las capas independientes de protección (IPL) también pueden ser monitoreadas digitalmente, y en consecuencia optimizadas y gestionadas de forma más efectiva con la ayuda de la IA aun cuando algunos protocolos de verificación tengan lugar con procedimientos manuales.

Finalmente están los controles de los límites operacionales, las inspecciones y planes de manejo de emergencia. Hay varias herramientas digitales que pueden capturar los resultados de estos ejercicios para ser analizados de manera muy rápida y simple con la ayuda de agentes IA.

3.2. Herramientas y procesos para gestionar las capas de protección

Normalmente las herramientas de apoyo para la implementación de sistemas de gestión de la Disciplina Operacional han sido sistemas manuales desconectados con claras limitaciones para su correlación y análisis.

La información allí contenida, que resulta clave para la optimización de procesos, hoy cuenta con una oferta creciente de soluciones para su digitalización. Ya hay plataformas que integran prácticamente todos los registros operativos, sea que provengan de operaciones manuales en campo o información digital disponible en sistemas BPCS o SCADA.

El monitoreo del estatus de las capas independientes de protección (IPL), la gestión de alarmas en los cuartos de control y la optimización de lazos de control también se vienen integrando en plataformas que recopilan toda esta información para que algoritmos y sistemas automáticos de la IA puedan detectar tempranamente a los malos actores y poder recomendar ajustes mejorando la seguridad y robustez en el control de las instalaciones industriales.

También hay disponibles sistemas para la evaluación de condición y confiabilidad de equipos y capas críticas que consideran los parámetros actuales sistemas (evaluación en tiempo real en función de la condición observada o el cumplimiento de protocolos de pruebas funcionales), así como el monitoreo de elusiones o desactivación de dispositivos o partes de un control automático crítico del proceso (*by-passes*) que eleve el nivel de riesgo en la operación y que antes solo se podía controlar con procedimientos administrativos.

Finalmente están las herramientas que integran información de las condiciones de proceso para equipos estáticos para asegurar su Integridad Mecánica que con la debida parametrización va a ayudar a predecir con menor incertidumbre la vida remanente de aquellos activos.

3.3. Usos de IA en la gestión de capas

Procedimientos operativos: Ajuste automático de la duración de los tiempos estándar de las actividades programadas en función de la capacidad demostrada por los ejecutantes con una discriminación de condiciones operativas y nivel de competencia o destreza del personal. Todo esto aplica tanto a los niveles más básicos de la disciplina operacional como a los más reactivos enfocados en inspecciones y manejo de emergencias.

Lazos de control: optimización de la sintonía adaptando las condiciones particulares del proceso en estados de transición u operando en diferentes condiciones de carga o tipo de producto.

Frecuencias: La IA puede recalcular de forma constante el nivel de riesgo en función de la probabilidad de ocurrencia tomando como base los datos actuales de proceso y la frecuencia real de eventos. Con el entrenamiento adecuado, un asistente puede sugerir ajustes en la frecuencia de aquellas rutinas.

Confiabilidad y vida útil remanente: tanto para equipos estáticos como rotativos, se puede aprovechar la integración de datos de proceso y condición actual para predecir el momento más favorable para efectuar una inversión de nuevos activos o el ajuste de parámetros operacionales que pueda mantener el sistema dentro de una zona segura (dentro de los límites de riesgo aceptados por la organización).

4. Ejemplos de IA en Gestión de Activos

4.1. Digitalización de documentos heredados no contextualizados

Dado que la IA solo es tan buena como los datos que puede comprender, nos enfocamos primero en la contextualización de datos.

Considera la investigación de Gartner sobre gestión de datos en 2024, que señaló que

aproximadamente el 85% de todos los datos empresariales son no estructurados.

Los datos sin procesar y no estructurados carecen del contexto necesario para poderlos aprovechar. Para la contextualización de datos, tomamos datos no estructurados como información de ingeniería y datos operativos, tanto heredados como actuales y les damos estructura y significado.

La IA nos ayuda a desbloquear datos para que la propia IA los pueda usar.

4.2. Optimización de consumo energético.

Hay varios frentes en los que la IA puede hacer un monitoreo y recálculo de parámetros operativos que reduzcan el consumo energético en plantas industriales.

Donde la transferencia de calor y procesos de combustión tienen un impacto sustancial en los costos operativos, un agente IA puede evaluar en tiempo real y recomendar ajustes de una mezcla óptima basado en datos de operaciones anteriores y diagnosticar problemas tales como ensuciamientos en el sistema (incrustaciones).

El monitoreo constante de corrientes en motores eléctricos, combinado con la información de las condiciones operativas, habilita al agente de IA para diagnosticar y proponer ajustes en el proceso de manera que siempre se pueda operar con el óptimo nivel consumo energético. Esto es particularmente útil en sistema de demanda variable, tales como utilidades, generación de aire, vapor o sistemas de enfriamiento.

4.3. Estrategias de confiabilidad ajustadas a las probabilidades observadas.

Uno de los costos más difíciles de cuestionar o ajustar en mantenimiento de instalaciones industriales es la definición de la frecuencia de las rutinas. La práctica común durante el arranque de una instalación es emplear tiempos estándar sugeridos por el fabricante que no pueden contemplar el contexto específico de cada operación y deberían ser entendidos como un punto de partida para ser ajustados en

función del contexto operativo específico en el proceso y su impacto en el negocio.

Cuando esto se hace sistemáticamente con el uso de técnicas como RCM /FMECA, normalmente forma parte de un proyecto puntual de mejoramiento que rara vez se llega a incorporar en la disciplina operativa regular ajustando estos estudios conforme las frecuencias de falla observadas. Este análisis de datos es intensivo y requiere un alto nivel de entrenamiento que involucra múltiples fuentes de información. Este es un escenario ideal para el uso de un agente de IA.

4.4. Ajuste de inventarios conforme lead times observados

De manera similar al punto anterior, los retos de la cadena de abastecimiento de recalculer *lead times* de manera constante demandan diversas fuentes de información y un entrenamiento específico que es perfectamente modelable para entrenar agentes de IA. Este ajuste, sumado la lectura permanente del cambiante contexto operativo permite recalculer los parámetros de inventario requeridos para una operación segura y confiable.

4.5. Corrección de tiempos estándar en O&M

La correlación de múltiples variables, tales como nivel de destreza de una cuadrilla de trabajo, características de un producto dado, o la condición esperada en un sistema que debe ser intervenido es compleja por la diversidad de fuentes de información. Un agente IA puede ser entrenado para efectuar los ajustes que permitan predecir de manera más efectiva los tiempos esperados en actividades críticas de operación, típicamente alistamientos, limpiezas o cambios de producto.

Esto resulta muy valioso para paradas de planta donde la reducción en la incertidumbre de cada actividad dentro de una ruta crítica permite optimizar no solo los costos, sino la propia duración de la parada, aspecto especialmente crítico en unidades altamente demandadas.

4.6. Pronóstico de vida útil remanente de equipos críticos

La información procedente de los diversos reportes operacionales y rutinas de inspección, información obtenida del monitoreo en línea y las consideraciones económicas que implica el reemplazo de un nuevo activo también implican un reto en instalaciones complejas. Un agente de IA con el entrenamiento adecuado puede escalar alertas sobre los equipos que presentan un nivel alto de riesgo o cuándo se encuentran trabajando en un régimen bajo el cual un nuevo activo operaría en una combinación OPEX / CAPEX más efectiva. Un agente también puede recomendar ajustes en los límites operativos en regímenes menos exigentes para extender la vida del activo sin afectar el nivel de servicio o función esperada de la unidad.

4.7. Monitoreo de integridad mecánica.

El desarrollo de drones (aéreos, terrestres o acuáticos) presenta alternativas mucho más seguras y económicas para hacer inspecciones de equipos en ubicaciones que anteriormente resultaban muy complejas y costosas (e.g. teas, parte alta de tanques de almacenamiento de líquidos y gases a granel, estructuras altas o sobre el agua, interior de zonas con atmósferas peligrosas, etc.). La facilidad para efectuar estas inspecciones, sumada a un análisis de las cambiantes condiciones de proceso, permite desarrollar algoritmos y entrenar agentes IA para el análisis en tiempo real de las condiciones de estos equipos y sistemas críticos.

4.8. Gemelos digitales de escenarios críticos y evaluación de planes

La creciente oferta de sistemas de monitoreo cuyas imágenes pueden ser analizadas digitalmente, tal como analizar el tiempo de residencia de personal en áreas peligrosas o intrusiones de personal no autorizado, o el uso adecuado de elementos de protección personal, abre un espacio muy interesante para evaluar los tiempos de respuesta y análisis de la efectividad y cumplimiento en los planes y procedimientos

durante simulacros. Esta información resulta de vital importancia para mejorar estos sistemas de respuesta a emergencia.

4.9. Identificación de vulnerabilidades cibernéticas en instalaciones remotas

El monitoreo constante del desempeño en redes de comunicaciones que tienen una condición de demanda cambiante permite que agentes de IA entrenados en identificar cambios en tiempos de latencia, ejecución de rutinas automáticas de pruebas, incluso en situaciones no regulares donde la IA agéntica puede ordenar la ejecución de una prueba *ad-hoc* en cualquier momento para validar un diagnóstico, es un campo con muchas oportunidades en la actualidad donde las amenazas son cada vez mayores. (Ej 1: *Stuxnet* (2010), Ataque al programa nuclear iraní, manipulando centrifugadoras gobernadas por un PLC; Ej 2: *CrashOverride / Industroyer* (2016), Apagón de una planta de generación eléctrica en Ucrania debido a la manipulación de disyuntores).

5. Conclusiones

5.1. Digitalizar con propósito

Antes de caer en una frenética carrera por adquirir herramientas de IA, es fundamental definir una hoja de ruta alineada con la estrategia de la organización entendiendo su nivel de madurez digital y de proceso, así como la cultura organizacional y el entorno en el cual busca obtener ventajas competitivas.

Establecer esta línea base definiendo los pasos a seguir de manera estructurada para alcanzar hitos automatización de procesos es algo que no se puede pasar por alto para obtener el mayor provecho de las nuevas capacidades que traen los agentes de IA. La cantidad de información generada puede llegar a ser abrumadora sin una clara estrategia de qué datos, cuándo, cómo y especialmente, para qué serán utilizados.

5.2. Cómo apalancar los gemelos digitales

Los **asistentes** empoderan a la fuerza laboral democratizando el conocimiento de la empresa y acelerando la toma de decisiones para alcanzar un mejor rendimiento mediante la clasificación de problemas, la recuperación de datos relacionados y la organización de una respuestas oportunas y funcionales. Lo que antes requería años de experiencia o conocer al experto idóneo, ahora puede obtenerse al instante utilizando datos y contexto propios.

Entonces habilitar plataformas que representen de la manera más fiel y detallada la operación, en tiempo real y con datos validados es la clave para habilitar la implementación de los agentes IA. Cada organización debe hacer un análisis cuidadoso del nivel de detalle y complejidad de tales gemelos digitales.

Habrán instalaciones industriales les bastará un simple diagrama de proceso en un HMI ligado con metadatos de sus equipos y variables capturadas de proceso en tiempo real para operar de manera segura y competitiva. Otras instalaciones requerirán plataformas mucho más complejas, como modelos 3D o 4D para alcanzar sus objetivos.

5.3. Hoja de ruta en el plan de digitalización y uso de la IA

Se ha enfatizado el papel crítico de la calidad de los datos en el éxito de la IA. El camino hacia una mayor visibilidad de los datos y el apoyo a los esfuerzos de digitalización incluye:

Auditar y unificar el panorama de datos: Evaluar la calidad y gobernanza de los datos actuales desde de la consolidación de fuentes fragmentadas.

Desafiar los procesos: Cuestionar cada flujo de trabajo explorando activamente cómo las tecnologías emergentes se pueden aplicar para conseguir mejores resultados.

Buscar experiencia comprobada. Para superar la incertidumbre y el escepticismo, conviene trabajar con socios tecnológicos

experimentados y con un historial de resultados comprobados.

Por último, en la estrategia de la hoja de ruta se debe definir el nivel de la IA, más o menos autónoma, considerando estos aspectos:

- Variabilidad de proceso. Procesos simples y predecibles no requieren asistentes IA con un sofisticado entrenamiento. Esto implica que merece la pena trabajar primero en la simplificación de procesos, validación de datos ingresados y reducción de variables. Es un error común buscar herramientas muy potentes que sean capaces de arreglar procesos complejos y pobre calidad en la imputación de datos, en lugar de simplificar esto primero.
- Riesgo de malas decisiones automatizadas. Utilizar matrices de riesgo que identifiquen el impacto que podría tener una decisión errada del asistente IA, dará una idea de cuanto puede estar la organización dispuesta a delegar procesos críticos en un sistema autónomo, y si pudiera emplear IA agéntica para tomar decisiones directamente en lugar de escalarlas a un funcionario responsable. El uso de la IA redundante entrenada para validar resultados entregados por otro agente IA, tal como lo haría un supervisor, puede apalancar el despliegue de la IA en más procesos.
- Velocidad y volumen transaccional. Es importante considerar la velocidad de respuesta requerida por un proceso que confiera ventajas competitivas y cuanto mayor sea el numero de transacciones, más valor aportará un agente IA.

Bibliografía

- [1] Mark Tweeddale. Managing Risk and Reliability of Process Plants. Gulf Professional Publishing, 2003, cap. 4-8, pp. 66-254.
- [2] CPPS Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Engineering Design for Process Safety. American Institute of Chemical Engineers, New York, 1993.
- [3] API, "Management of Process Hazards, Production and Refining Departments." API Recommended Practice 750, 1st ed. 1990.
- [4] H. Paul Barringer. Predict Future Failures from your Maintenance Records, Humble Texas, 2003.
- [5] John Moubray. RCM II Reliability Centered Maintenance. Industrial Press, 1997.

Biografía del Autor

Ingeniero Mecánico con un MBA de ESADE, con más de 30 años de experiencia en operaciones y mantenimiento de instalaciones en diversas industrias (O&G, Petroquímica, Pulpa y Papel, Terminales Portuarias y Manufactura). Ocupó cargos en Confiabilidad, Seguridad de Proceso, Logística y Gerencia de Mantenimiento y actualmente es Consultor Industrial para Hexagon ALI.

Nombre: Dario Hernando Becerra Piñeros
Nacionalidad: Colombia
Teléfono: +57 318 7681476
Correo: dario.becerra@hexagon.com