Lo que la IA nunca hará en mantenimiento mina

Lo que seguirá requiriendo responsabilidad humana

La inteligencia artificial subirá cada vez más rápido los primeros peldaños del conocimiento. Pero la decisión, la responsabilidad y la conducción de personas siguen estando arriba, donde ningún algoritmo puede pisar.

por Victor Barrientos Boccardo

Ingeniero civil mecánico · Fundador de INVICTUM SpA

¿Quién firma cuando el modelo se equivoca?

La pregunta que ninguna plataforma predictiva responde.

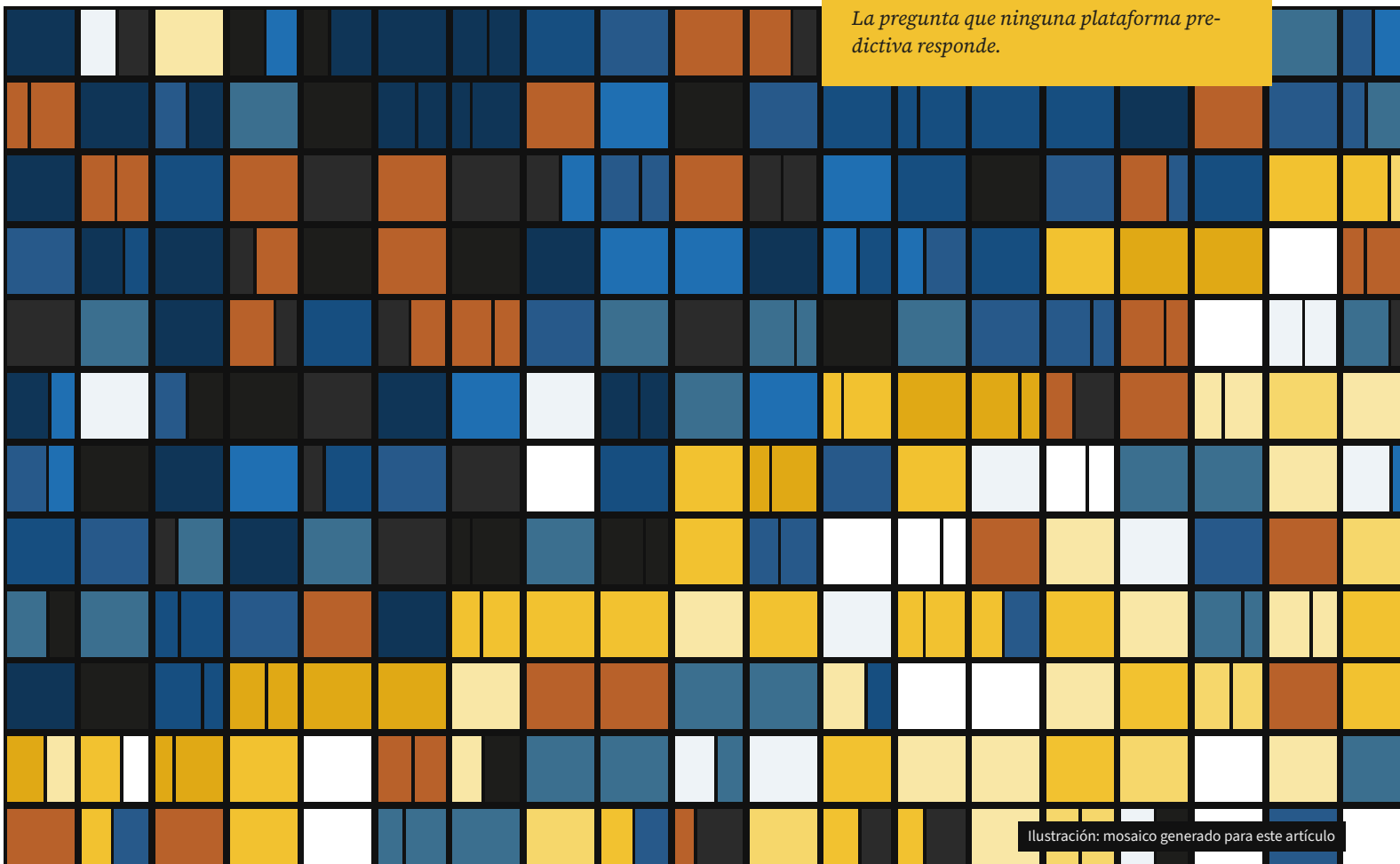


Ilustración: mosaico generado para este artículo

LA IDEA EN SÍNTESIS

La creencia

La IA reemplazará primero el trabajo manual y de menor calificación.

Lo que muestran los datos

En mantenimiento ocurre al revés: la ejecución está entre los oficios menos expuestos (4%) y la ingeniería y la gestión entre los más expuestos (32% a 46%).

La explicación

Sobre la escalera del conocimiento de Klaus North, la IA sube con fuerza los peldaños de datos, información y diagnóstico, pero no los de motivación, elección y responsabilidad.

La respuesta

Usar la IA para acelerar los peldaños de abajo, proteger deliberadamente los de arriba y evitar que la propia gente deje de construirlos.

Son las tres de la mañana en el rajo. El sistema de monitoreo de condición levanta una alerta: la tendencia de vibración del rodamiento del motor de levante de la pala 03 cruzó su umbral, y el modelo predictivo estima una alta probabilidad de falla en las próximas 200 horas. La pala carga una fracción importante del mineral del día, y operaciones quiere que siga cargando. El modelo no sabe que la próxima detención programada se movió una semana porque falta un repuesto, ni que el último cambio de ese rodamiento se hizo con un procedimiento que el mecánico más antiguo del turno nunca dejó de cuestionar.

Alguien tiene que decidir. Y ese alguien no será el modelo.

La conversación sobre inteligencia artificial en la industria suele plantearse como una pregunta de reemplazo: ¿qué porcentaje del trabajo hará la máquina? Es una pregunta legítima, pero incompleta. En mantenimiento mina la pregunta relevante es otra: ¿qué parte del trabajo depende de *saber*, y qué parte depende de *responder*? La IA avanza a gran velocidad en la primera. En la segunda no tiene cómo entrar.

Este artículo propone una forma de separar ambas, apoyándose en un modelo clásico de la gestión del conocimiento, la «escalera del conocimiento» de Klaus North, y en los datos disponibles sobre la exposición de las ocupaciones a la IA. La conclusión es menos obvia de lo que parece: en una gerencia de mantenimiento, la IA presiona más arriba que abajo.

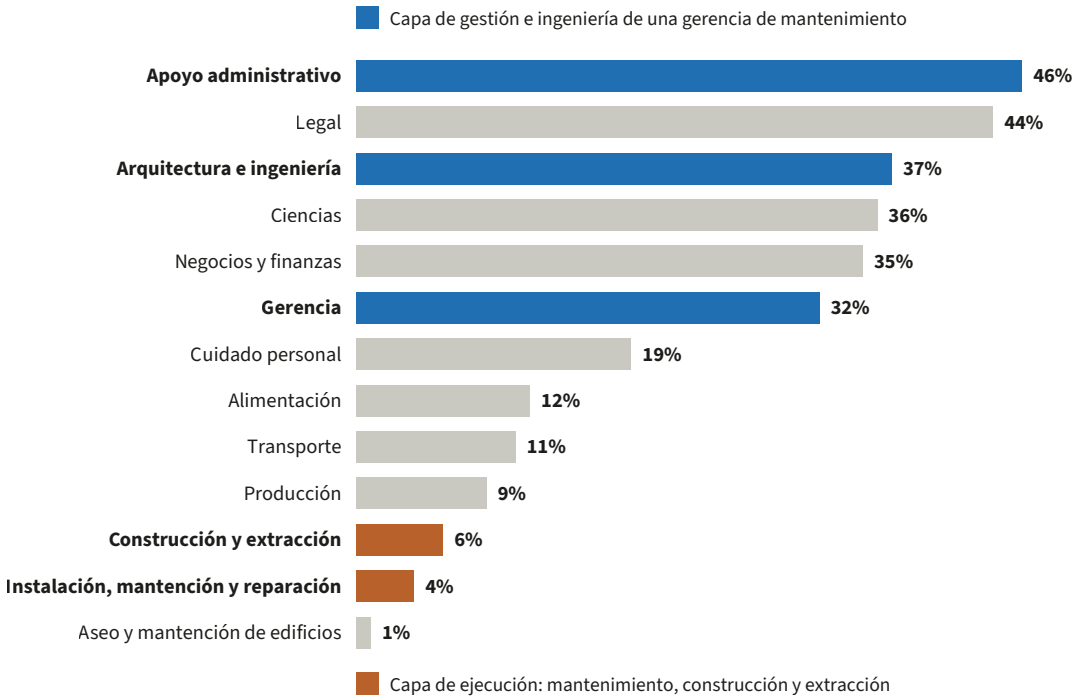
La paradoja de la exposición

Desde el trabajo de Autor, Levy y Murnane, los economistas analizan la automatización por tareas y no por cargos: un mismo puesto reúne tareas que una máquina puede hacer y otras que no. Con ese enfoque, los estudios sobre IA coinciden en un punto: los oficios manuales y de presencia física son los menos expuestos, es decir, los que tienen menos tareas que la IA podría realizar. Un informe de Goldman Sachs de 2023, que analizó más de 900 ocupaciones en Estados Unidos, estimó que solo un 4% de las tareas de instalación, mantención y reparación podría automatizarse con IA generativa (la que redacta, resume y analiza, como los asistentes de chat), frente a un 46% en apoyo administrativo y un 37% en arquitectura e ingeniería (vea el gráfico «¿Dónde presiona la IA?»). Un estudio de investigadores de OpenAI y la Universidad de Pensilvania llegó a un cuadro similar: cerca del 80% de los trabajadores estadounidenses tiene al menos una décima parte de sus tareas al alcance de estos modelos, pero solo uno de cada cinco tiene la mitad o más (Eloundou y coautores).

A primera vista, la noticia es tranquilizadora para quienes trabajamos en mantenimiento. Pero el 4% describe al mecánico que ejecuta, no a la gerencia completa. En una gerencia de mantenimiento mina conviven dos mundos. El de la ejecución (mecánicos, eléctricos, soldadores, lubricadores) está entre los más protegidos de la economía. El de la ingeniería y la gestión (planificación, programación, confiabilidad, control de costos, administración de contratos) vive en las categorías más expuestas. Estados de pago, informes de gestión, análisis de tendencias, planes de mantenimiento y revisión de cumplimientos contractuales son exactamente el tipo de tarea que la IA ya ejecuta razonablemente bien.

¿Dónde presiona la IA?

Porcentaje de las tareas de cada grupo ocupacional que podría automatizarse con IA generativa (Estados Unidos).



Fuente: J. Briggs y D. Kodnani, Goldman Sachs, «The Potentially Large Effects of Artificial Intelligence on Economic Growth», 2023, sobre datos O*NET. Colores asignados por el autor para distinguir las dos capas de una gerencia de mantenimiento.

La paradoja es que, en mantenimiento, la IA no desplaza primero el trabajo «de menor calificación». Desplaza primero el trabajo de escritorio. El mecánico está más protegido que el planificador, y el administrador de contrato tiene buena parte de su jornada documental expuesta.

Conviene, sin embargo, leer estos porcentajes con cuidado. Miden la exposición de tareas a la IA generativa, no a la robótica, y exposición no es reemplazo. En un estudio de 2013, publicado en 2017, Frey y Osborne estimaron que el 47% de los empleos de Estados Unidos estaba en alto riesgo de automatización. Investigadores del centro alemán ZEW mostraron después que, cuando se considera la variedad de tareas dentro de cada ocupación, la proporción de empleos en alto riesgo baja de 38% a 9% (Arntz, Gregory y Zierahn). En la mayoría de los casos, lo que la IA hace es cambiar el contenido del trabajo, no eliminarlo. La pregunta interesante es qué parte del contenido sobrevive.

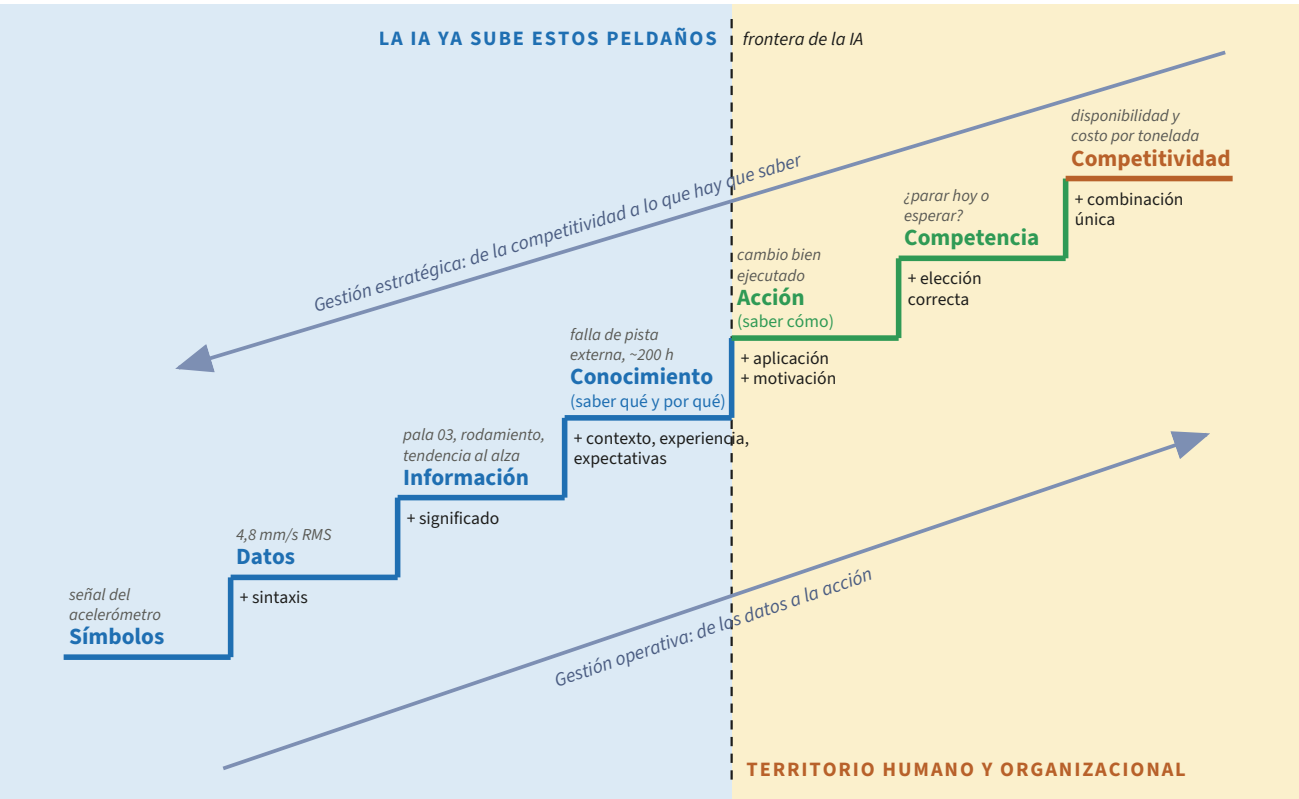
La escalera del conocimiento

Para responderla sirve un modelo que Klaus North, profesor de la Wiesbaden Business School, propuso para explicar cómo las organizaciones crean valor a partir del conocimiento. North lo describe como una escalera en que cada peldaño se construye agregando algo al anterior (vea el gráfico «La escalera del conocimiento y la frontera de la IA»).

Los símbolos, ordenados por reglas, se convierten en datos. Los datos, con significado, se convierten en información. La información, puesta en contexto y cruzada con experiencia y expectativas, se convierte en conocimiento: saber qué y por qué. El conocimiento, aplicado y movido por una motivación, se transforma en acción: saber cómo. La acción correcta en el momento correcto es competencia. Y un conjunto de competencias combinadas de un modo que otros no pueden imitar es competitividad.

La escalera del conocimiento y la frontera de la IA

Cada peldaño agrega algo al anterior. La IA sube con fuerza los cuatro primeros; los agregados de arriba exigen a alguien que quiera algo y responda por lo que elige.



Adaptado de K. North y G. Kumta, *Knowledge Management: Value Creation Through Organizational Learning*, 2.ª ed., Springer, 2018, fig. 2.1. Ejemplos de mantenimiento mina y frontera de la IA agregados por el autor.

North insiste en dos ideas centrales para esta discusión. La primera es que todos los peldaños deben construirse: si falta uno, la organización «tropieza» al subir o al bajar, y ni la estrategia ni la operación funcionan. La segunda, que toma de Georg von Krogh y Johan Roos, es que la competencia no es un activo que se guarda en una bodega, sino un evento: existe solo cuando el conocimiento se encuentra con una tarea concreta.

Si se pone la IA sobre esta escalera, su posición es clara. Sube con enorme fuerza los cuatro primeros peldaños: convierte señales en datos, datos en información y, cada vez mejor, información en diagnóstico. En el caso de la pala 03, el modelo puede llegar con solidez hasta «falla de pista externa, quedan unas 200 horas». Ese es el territorio donde se concentra la alta exposición del trabajo de escritorio.

Pero los dos agregados de arriba, la motivación que lleva a actuar y la elección correcta en el momento correcto, no son tareas más difíciles que un algoritmo resolverá con más datos. Son peldaños que, por su naturaleza, requieren a alguien que quiera algo y que responda por lo que elige.

> «La IA va a saber cada vez más. Pero nunca va a responder.»

Lo que la IA no hará por naturaleza

Conviene distinguir entre lo que la IA no puede hacer *todavía* y lo que no podrá hacer *por naturaleza*. Lo primero cambia cada año; lo segundo es donde está la tesis. En mantenimiento mina identifico cuatro capacidades del segundo tipo.

Responder. Una IA no puede firmar un permiso de trabajo, liberar un camión a operación ni responder ante Sernageomin o un tribunal después de un accidente. Puede recomendar, pero responder por lo decidido exige a alguien que pueda perder algo: su firma, su cargo, su conciencia. En una actividad donde una mala decisión puede costar una vida, esto no es un detalle administrativo. Es el centro del oficio.

Decidir qué importa. Un modelo optimiza contra un objetivo, pero alguien tiene que definir ese objetivo. ¿Disponibilidad o costo? ¿Cumplir el plan minero del mes o proteger el componente para el próximo año? ¿Aceptar el riesgo de una pala que carga buena parte del mineral del día? Son conflictos de valores entre gerencias, y resolverlos requiere legitimidad, no cálculo.

Conducir personas en el barro. North recuerda que las personas solo actúan si están motivadas. Que un mecánico confíe en su supervisor a las tres de la mañana, bajo cero y frente a una falla que no cuadra, es algo que se gana con historia compartida. Lo mismo ocurre al negociar con un contratista, con un sindicato o con una operación que necesita el equipo «para ayer». Eso es relación y poder, y la IA no tiene ninguno de los dos.

Saber lo que nunca se registró. North usa la imagen del iceberg, que remite a Michael Polanyi: lo explícito, lo que está escrito, es la punta visible; la mayor parte del conocimiento de una organización está bajo el agua, en lo que la gente sabe hacer pero nunca escribió. Ikujiro Nonaka mostró en un clásico de HBR que la ventaja de las empresas que más innovan está justamente en convertir ese saber tácito en explícito. La IA solo aprende de lo que emergió. Las órdenes de trabajo cerradas con «se cambió y quedó bien», los códigos de falla genéricos y el «esa máquina siempre hace eso cuando viene de la fase 3» del mantenedor antiguo no están en el sistema. Y el modelo no puede notar que el dato miente si no hay alguien que conozca el terreno.

Lo que no conviene llamar «nunca»

El diagnóstico sensorial (el ruido, el olor, la vibración que se siente con la mano), las fallas sin precedentes y el trabajo físico en ambientes no estructurados son difíciles para la IA hoy. Pero los sensores, los modelos y la robótica avanzan, y quien construya su argumento sobre estos ejemplos lo verá debilitarse en pocos años. Al revés, en predicción, planificación, programación y análisis de confiabilidad es probable que la IA supere al profesional promedio. Defender esos territorios como humanos es una batalla perdida, y además innecesaria.

Tres casos en que falló la relación entre personas y automatización

Air France 447 (2009). Las sondas de velocidad se congelaron, el piloto automático se desconectó y la tripulación, con poca práctica de vuelo manual a gran altitud, no reconoció la pérdida de sustentación. Murieron 228 personas. El informe final de la autoridad francesa (BEA, 2012) recomendó reforzar el entrenamiento en vuelo manual.

Uber, Tempe (2018). Un vehículo autónomo de pruebas atropelló a una peatona. La NTSB concluyó que la operadora de seguridad estaba distraída y señaló la complacencia frente a la automatización como factor.

Boeing 737 MAX (2018-2019). Un sistema automático de control dependía de un solo sensor, y muchos pilotos no sabían que existía. Dos accidentes dejaron 346 muertos.

En los tres casos, el problema no fue solo técnico: falló la relación entre las personas y el sistema automatizado, y con ella la claridad sobre quién debía notar que algo no cuadraba.

El resultado es un mapa en que cada rol de la gerencia cae en una zona distinta, según cuánto de su trabajo está expuesto a la IA y cuánto depende de responder, estar presente y conducir personas (vea el gráfico «Mapa de roles de una gerencia de mantenimiento»).

Señales que advierten que su gerencia confunde IA con gestión del conocimiento

El proyecto de IA lo lidera TI, y la gerencia de mantenimiento participa como «usuario».

El éxito se mide por alertas generadas o modelos desplegados, no por decisiones mejoradas.

Nadie revisa sistemáticamente las alertas falsas ni las fallas que el modelo no anticipó.

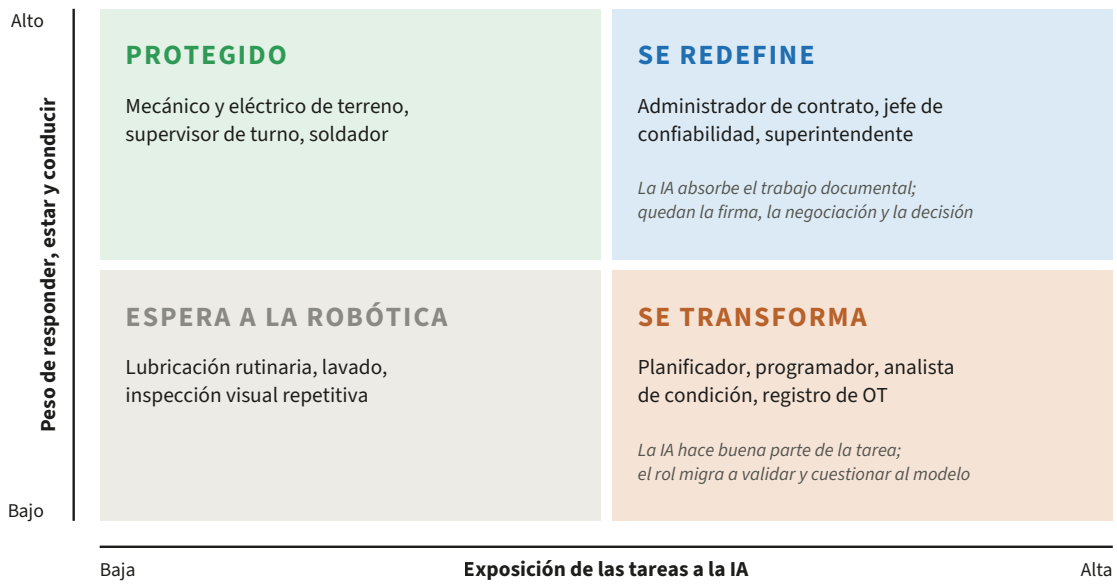
Las órdenes de trabajo se siguen cerrando con descripciones genéricas, pero se espera que el modelo aprenda de ellas.

Los mantenedores más antiguos se retiran sin un mecanismo para capturar lo que saben.

La pregunta «¿quién firma si el modelo se equivoca?» no tiene una respuesta clara.

Mapa de roles de una gerencia de mantenimiento

Posición ilustrativa de los roles según la exposición de sus tareas a la IA y el peso de la responsabilidad, la presencia y la conducción.



Elaboración del autor. Las posiciones son ilustrativas y varían según la faena y el diseño de cada cargo.

Dos riesgos que la escalera hace visibles

Saltarse peldaños. Si la IA hace siempre el paso del dato al diagnóstico, el mantenedor joven nunca construye ese peldaño en su cabeza. Llega a la decisión crítica sin el criterio necesario para cuestionar al modelo. La literatura sobre factores humanos llama a esto sesgo de automatización: la tendencia a confiar en la recomendación de un sistema incluso cuando las señales del entorno la contradicen (Parasuraman y Manzey). La investigación sobre confianza en la automatización propone el antídoto: una confianza calibrada, ni mayor ni menor que la capacidad real del sistema (Lee y See). Lisanne Bainbridge lo anticipó en 1983 con lo que llamó la ironía de la automatización: mientras más se automatiza, menos práctica tiene el operador justo para el momento en que la automatización falla. Un experimento con 758 consultores de BCG lo confirmó con IA generativa: en tareas dentro de lo que el modelo hace bien, la calidad de su trabajo mejoró más de 40%; en una tarea fuera de ese límite, quienes usaron IA tuvieron 19 puntos porcentuales menos de probabilidad de llegar a la respuesta correcta que quienes no la usaron (Dell'Acqua y coautores). En el lenguaje de North, es una escalera con un peldaño ausente. Todo funciona mientras la falla se parezca a las del pasado. El día que aparece una falla inédita, el modelo no sabe, y el equipo ya no sabe (vea el gráfico «¿Está su gente construyendo los peldaños?»).

Señales que advierten que su gente está dejando de construir peldaños

Los profesionales jóvenes no pueden explicar una recomendación del modelo sin tener el modelo delante.

Ante una alerta, la primera reacción es abrir el sistema, no ir al equipo.

Las discrepancias entre el modelo y la inspección en terreno se resuelven casi siempre a favor del modelo.

Los análisis de causa raíz se han vuelto más rápidos, pero también más parecidos entre sí.

Los supervisores dedican más tiempo a validar reportes que a estar en terreno.

Confundir IA con gestión del conocimiento. En su modelo de madurez, North sitúa las soluciones tecnológicas en el primer nivel. Observa que muchas empresas comienzan su gestión del conocimiento por ahí y luego descubren que la tecnología no rinde sin las condiciones organizacionales y motivacionales que la rodean. Una minera que compra una plataforma de mantenimiento predictivo y cree que con eso gestiona su conocimiento está en el primer escalón, aunque la tecnología sea de punta.

¿Está su gente construyendo los peldaños?

La misma tecnología puede fortalecer o erosionar el criterio del equipo. La diferencia se nota cuando aparece una falla que nadie había visto.

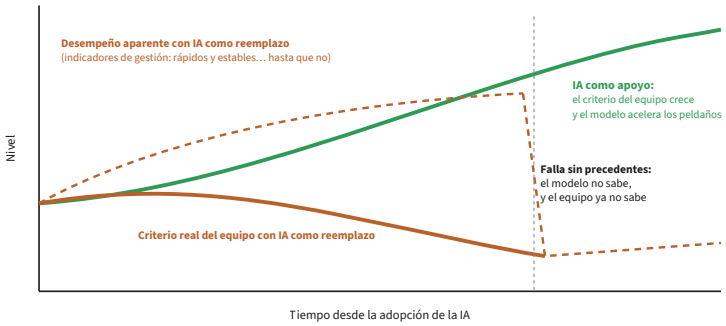


Gráfico conceptual elaborado por el autor; no representa datos medidos.

Cómo proteger los peldaños de arriba

De estos riesgos se derivan algunas prácticas concretas. Ninguna exige frenar la adopción de IA; todas buscan que la organización suba la escalera más rápido sin dejar peldaños sin construir.

Diagnostique primero, consulte después. En la formación de profesionales nuevos, exija una hipótesis propia antes de mirar la recomendación del modelo. La diferencia entre ambas es la oportunidad de aprendizaje.

Exija el razonamiento, no solo la respuesta. Una recomendación que no se puede explicar no se puede cuestionar. Pida a proveedores y equipos internos que los modelos muestren qué datos pesaron en cada alerta.

Mantenga la firma en manos humanas, y con nombre. Defina por escrito qué decisiones no se delegan: liberación de equipos, aceptación de riesgo operacional, extensión de vida de componentes críticos. Que la IA recomiende no debe diluir quién responde.

Capture el iceberg antes de que se jubile. Use la IA para lo que mejor hace con el conocimiento tácito: entrevistar, transcribir, ordenar y hacer buscable la experiencia de los mantenedores veteranos. Hay evidencia de que funciona: en un estudio con más de 5.000 agentes de atención al cliente, un asistente de IA aumentó la productividad 14% en promedio y 34% entre los novatos, en buena medida porque les transmitía las prácticas de los mejores (Brynjolfsson, Li y Raymond).

Mida lo que el modelo no ve. Lleve un registro de las fallas que el modelo no anticipó y de las alertas que el terreno desmintió. Ese registro es la mejor medida del criterio que la organización todavía conserva.

Índice de Dependencia Cognitiva de IA (propuesta)

Evalúe a su gerencia de 1 a 5 en cada pregunta:

Diagnóstico autónomo. ¿Su equipo formula una hipótesis de falla antes de mirar el modelo?

Capacidad de cuestionar. ¿Se registran y analizan las discrepancias entre el modelo y el terreno?

Presencia. ¿La supervisión pasa más tiempo junto al equipo que validando reportes?

Saber tácito. ¿Existe un mecanismo para capturar lo que saben los veteranos?

Firma con nombre. ¿Está escrito quién responde por cada decisión crítica que recomienda un modelo?

Un puntaje bajo 15 de 25 sugiere que la organización está dejando de construir peldaños. Es una herramienta de autodiagnóstico propuesta por el autor, no un instrumento validado.

Vuelva a terreno. Si la IA libera tiempo de escritorio, invierta una parte en presencia. El supervisor que valida reportes no construye peldaños; el que está junto al equipo, sí.

• • •

North propone recorrer la escalera en dos sentidos. De abajo hacia arriba, la gestión operativa convierte datos en acción. De arriba hacia abajo, la gestión estratégica pregunta qué competencias se necesitan para ser competitivo y, desde ahí, qué conocimiento y qué datos hacen falta. La IA es una aliada formidable en el primer recorrido. El segundo sigue siendo responsabilidad de la gerencia.

Por eso la pregunta estratégica para una gerencia de mantenimiento no es cuánto trabajo reemplazará la IA, sino qué competencias deben seguir siendo humanas y cómo usar la IA para subir más rápido los peldaños de abajo sin que su gente deje de construirlos.

La IA va a saber cada vez más. Pero nunca va a responder. Y en mantenimiento mina, donde cada decisión tiene consecuencias para la producción y para la vida de las personas, responder es el oficio. ■

Nota metodológica

Las cifras de exposición provienen del informe de Goldman Sachs (2023) y miden la proporción de tareas de cada grupo ocupacional que podría automatizarse con IA generativa en Estados Unidos; no son estimaciones de empleos perdidos. El ajuste de 38% a 9% corresponde a Arntz, Gregory y Zierahn (2017).

La escena de la pala 03 es un caso ilustrativo construido por el autor a partir de situaciones habituales en faena. La escalera del conocimiento se adapta de North y Kumta (2018). El «Mapa de roles» y el gráfico «¿Está su gente construyendo los peldaños?» son esquemas conceptuales del autor, no datos medidos.

Cuadernos de mantenimiento y confiabilidad · N.° 5 de 5

N.° 1. La trampa del TBO: cuándo intervenir por tiempo.

N.° 2. El monitoreo que no avisa: cuándo intervenir por condición.

N.° 3. La máquina sabe quién administra el contrato: qué se pierde cuando cambia la organización.

N.° 4. Dos gigantes, dos lógicas: por qué cada industria decide distinto.

N.° 5. Lo que la IA nunca hará en mantenimiento mina (este número): quién responde por la decisión.

Caso aplicado: «Cómo bajar más de 30% el costo por hora de los neumáticos mineros».

Victor Barrientos Boccardo *es ingeniero civil mecánico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con más de veinte años en mantenimiento y confiabilidad de equipos mineros en empresas mineras en Chile. Es fundador de INVICTUM SpA, consultora en confiabilidad y mantenimiento minero, y autor de seis libros sobre mantenimiento de equipos mineros, cognición del mantenedor, sesgos cognitivos y estrategia de reemplazo de flotas.*

Referencias. Arntz, M., Gregory, T. y Zierahn, U. (2017), «Revisiting the Risk of Automation», *Economics Letters* 159. · Autor, D. H., Levy, F. y Murnane, R. J. (2003), «The Skill Content of Recent Technological Change», *Quarterly Journal of Economics* 118(4). · Bainbridge, L. (1983), «Ironies of Automation», *Automatica* 19(6). · BEA (2012), *Final Report on the Accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203, Flight AF 447*. · Briggs, J. y Kodnani, D. (2023), «The Potentially Large Effects of Artificial Intelligence on Economic Growth», Goldman Sachs Economics Research. · Brynjolfsson, E., Li, D. y Raymond, L. (2023), «Generative AI at Work», NBER Working Paper 31161; versión publicada en *Quarterly Journal of Economics* 140(2), 2025 · Dell'Acqua, F. et al. (2023), «Navigating the Jagged Technological Frontier», Harvard Business School Working Paper 24-013. · Eloundou, T., Manning, S., Mishkin, P. y Rock, D. (2024), «GPTs Are GPTs: Labor Market Impact Potential of LLMs», *Science* 384. · Frey, C. B. y Osborne, M. A. (2017), «The Future of Employment», *Technological Forecasting and Social Change* 114. · Lee, J. D. y See, K. A. (2004), «Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance», *Human Factors* 46(1). · Nonaka, I. (1991), «The Knowledge-Creating Company», *Harvard Business Review*, noviembre-diciembre. · North, K. y Kumta, G. (2018), *Knowledge Management: Value Creation Through Organizational Learning*, 2.ª ed., Springer. · NTSB (2019), *Collision Between Vehicle Controlled by Developmental Automated Driving System and Pedestrian, Tempe, Arizona*, HAR-19/03. · Parasuraman, R. y Manzey, D. H. (2010), «Complacency and Bias in Human Use of Automation», *Human Factors* 52(3). · Polanyi, M. (1966), *The Tacit Dimension*, Doubleday. · U.S. House Committee on Transportation and Infrastructure (2020), *The Design, Development and Certification of the Boeing 737 MAX*. · von Krogh, G. y Roos, J. (1996), «Five Claims on Knowing», *European Management Journal* 14(4).