CMC CHILE 2026

Sesión
SPARK

1

SPARK SESIÓN 24

CONGRESO DE MANTENIMIENTO & CONFIABILIDAD CHILE 7ª EDICIÓN



Del mantenimiento predictivo al gobierno autónomo del mantenimiento.

Cómo la IA Agéntica puede optimizar continuamente las políticas de mantenimiento.

- Adolfo Crespo Márquez
- Profesor de la ETSI de la Universidad de Sevilla

2

Contenido

Parte 1 – Fundamentos de la Transformación Digital
Activos conectados y disponibilidad de datos.
Visibilidad operacional, monitorización e indicadores clave (KPIs).
Los datos proporcionan información, pero no generan decisiones.

Parte 2 – Estrategias de Mantenimiento Asistidas por IA
La inteligencia artificial como apoyo a la toma de decisiones.
Mantenimiento predictivo, basado en riesgo y optimizado.
De los datos a las recomendaciones.

Parte 3 – Gobierno Autónomo del Mantenimiento
Mantenimiento basado en agentes y orientado a eventos.
Ejecución continua de políticas y aprendizaje.
De las decisiones a la acción autoadaptativa.



Agentes inteligentes que analizan, deciden y coordinan acciones de forma continua.

Conclusiones clave
La digitalización constituye el punto de partida, no el objetivo final.
La inteligencia artificial transforma los datos en mejores decisiones.
La autonomía permite generar valor de forma continua y escalable.
El mantenimiento inteligente se convierte en una capacidad estratégica para la organización.

3

Nuestro viaje: de una arquitectura sólida a un sistema inteligente



Construyendo la arquitectura digital

- La base EAM-APM-AIP
- Estándares e interoperabilidad
- Las barreras persistentes

Activando la capa de inteligencia

- IA generativa para modelado dinámico
- De la teoría a la práctica: un caso de estudio
- El futuro ecosistema inteligente

4

Parte 1. Fundamentos

Los cuatro pilares de un activo digital

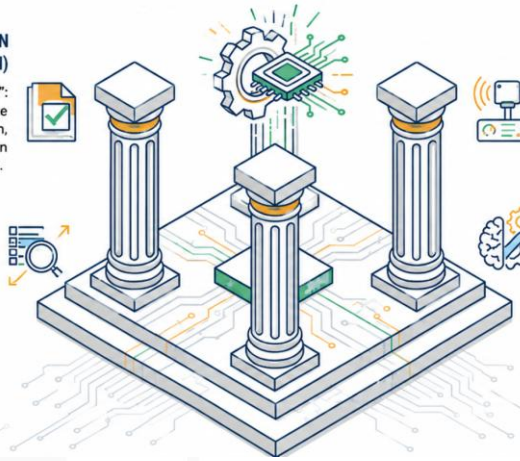
Un verdadero activo digital se construye sobre una base de datos estructurada. Estos cuatro modelos fundamentales proporcionan el marco para definir, priorizar, monitorear y gestionar inteligentemente sus activos a lo largo de todo su ciclo de vida.

MODELO DE DEFINICIÓN DEL ACTIVO (ADM)

El "qué" y el "dónde": establece una única fuente de verdad para la identificación, clasificación y localización de los activos.

MODELO DE CRITICIDAD DEL ACTIVO (ACM)

El "por qué" y el "cuánto importa": prioriza los activos en función del impacto en la seguridad, las operaciones y la continuidad del negocio.



MODELO DE MONITOREO DEL ACTIVO (AMM)

El "qué está pasando ahora": aprovecha datos en tiempo real e históricos para proporcionar visibilidad continua sobre el estado y el rendimiento del activo.

MODELO DE GESTIÓN INTELIGENTE DEL ACTIVO (IAMM)

El "qué hacer" y el "qué pasará después": integra los datos para mejorar la toma de decisiones (RCM, RBM, RAMS, AHI) y optimizar las decisiones actuales y predecir futuros estados.

5

Parte 1. Fundamentos

Construyendo la base de datos: una mirada más cercana a los cuatro modelos

Estos cuatro modelos fundamentales proporcionan el marco de datos estructurado esencial para la gestión inteligente de activos, permitiendo una única fuente de verdad y una toma de decisiones basada en datos.

MODELO DE DEFINICIÓN DEL ACTIVO (ADM)

Un marco integral para la identidad de los activos en todos los sistemas.

Dimensiones clave de datos:

- **Datos de registro físico:** identificadores únicos, ciclo de vida, códigos de fábrica
- **Datos de ubicación funcional:** ubicación física en una jerarquía de activos
- **Datos de clase de activo:** tecnología, especificaciones técnicas, catálogos de fallos
- **Datos del sistema de referencia del activo:** coordenadas geoespaciales para infraestructura o redes

MODELO DE CRITICIDAD DEL ACTIVO (ACM)

Permite la toma de decisiones basada en el riesgo y la asignación de recursos.

Dimensiones clave de datos:

- **Impacto en la seguridad:** impacto en la seguridad, las operaciones, el cumplimiento
- **Integración con la estrategia de mantenimiento:** vínculo con las estrategias RCM, MTA, basadas en riesgo
- **Contribución a los objetivos:** apoyo a los objetivos del negocio
- **Contribución al monitoreo:** orientación hacia activos IoT o de alto riesgo
- **Vínculo con los modelos LCC:** información para decisiones de inversión y reemplazo a largo plazo

MODELO DE MONITOREO DEL ACTIVO (AMM)

Infraestructura para el monitoreo en tiempo real del estado a través de redes IoT.

Componentes clave:

- **Redes IoT:** sensores, nodos y servicios en la nube para la adquisición de datos
- **Procesamiento de señales y ETL:** transforma los datos sin procesar en información accionable
- **Infraestructura analítica:** escalable, frecuentemente basada en microservicios, para procesar grandes volúmenes de datos

MODELO DE GESTIÓN INTELIGENTE DEL ACTIVO (IAMM)

Conecta los datos estructurados de los activos con tecnologías avanzadas de apoyo a la decisión.

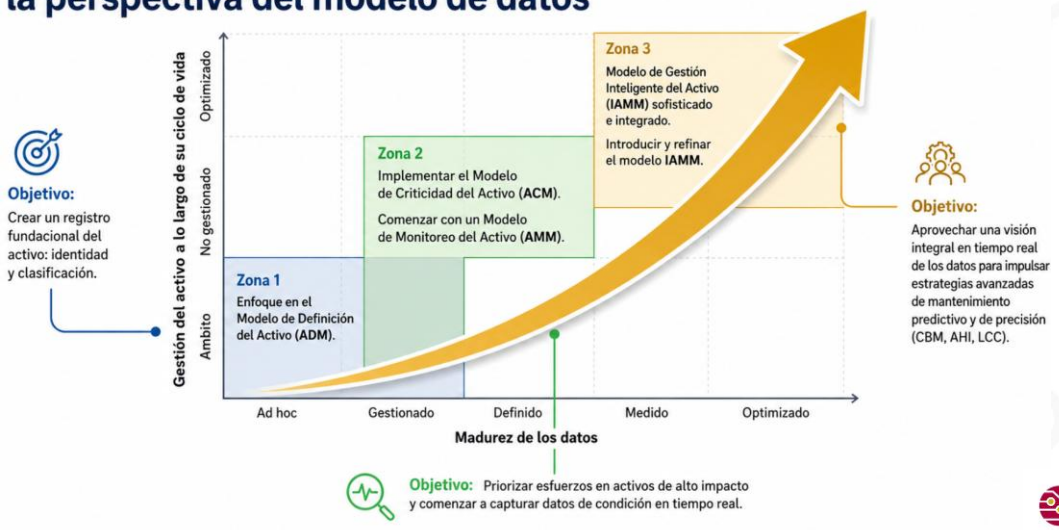
Dimensiones metodológicas clave:

- Análisis de causa raíz con IA (RCA)
- Mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM)
- Monitoreo basado en riesgo (RBM)
- Análisis predictivo (IA), optimización (RTA), GEMELOS DIGITALES (RAMS)
- Análisis del ciclo de vida del activo (LCC)

6

Parte 1. Fundamentos

Superponiendo el mapa: la perspectiva del modelo de datos



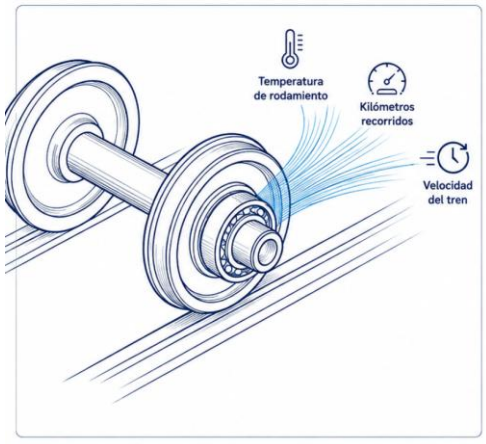
7

Parte 1. Fundamentos

CMC CHILE 2026

Postal del viaje: un programa de CBM para rodamientos de eje

Cómo los modelos de datos estructurados permiten la detección predictiva de fallos y la extensión de los intervalos de mantenimiento.



Definición del activo
Identificadores únicos, datos del fabricante/modelo y ubicación funcional (p. ej., "Eje delantero izquierdo, Tren-045") garantizan un seguimiento preciso.

Criticidad del activo
Puntuaciones altas de impacto operacional (90/100) y riesgo para la seguridad (85/100) priorizan este componente para un monitoreo avanzado.

Monitoreo del activo
Recolección continua de datos en parámetros clave:
- Temperatura de rodamiento (umbral: 100 °C)
- Kilómetros recorridos
- Velocidad del tren

Gestión inteligente (CBM)
Los modelos de ML usan los datos de monitoreo para:
- **Detectar anomalías:** Identificar desviaciones del comportamiento normal de la temperatura.
- **Diagnosticar modos de fallo:** Clasificar el tipo de fallo inminente (desgaste, fractura).
- **Predecir vida útil restante (RUL):** Estimar el tiempo hasta el fallo en kilómetros, permitiendo extender los intervalos de mantenimiento hasta 30.000 km.

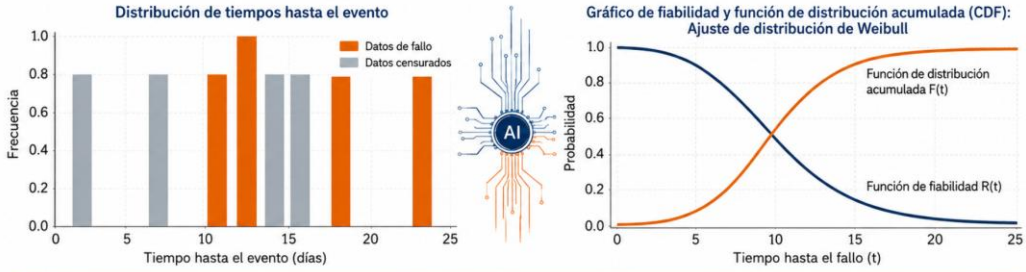
8

Parte 2. La estrategia asistida por IA

Estudio de caso – Parte 1: Estableciendo el perfil de fallos

Objetivo: Antes de optimizar una política, debemos comprender el comportamiento de fallos del activo. ¿Puede GenAI modelar esto con precisión a partir de datos en bruto?

Prompt: Dado un conjunto de datos de fallos (10, 12, 18, 13, 23) y datos censurados procedentes de un programa de mantenimiento preventivo (15, 13, 7, 12, 2), ajustar una distribución de Weibull e interpretar los resultados.



La IA ajusta correctamente una distribución de Weibull ($\beta = 4{,}05$, $\eta = 18{,}2$) mediante estimación de máxima verosimilitud, proporcionando la base estadística para la optimización.

9

Parte 2. La estrategia asistida por IA

Estudio de caso – Parte 2: Optimización analítica de políticas de mantenimiento preventivo (PM)

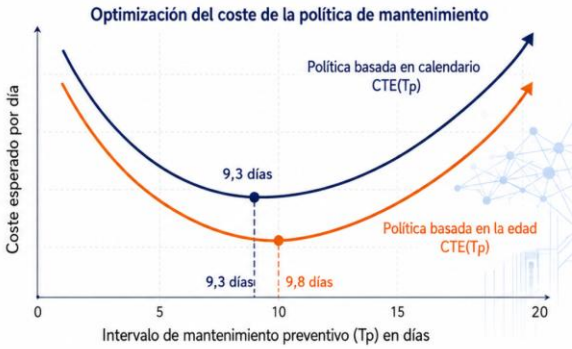
Objetivo: Determinar el tiempo óptimo del ciclo de mantenimiento preventivo (Tp) comparando dos políticas clásicas basadas en el coste.

Datos de entrada

Fiabilidad: Weibull ($\beta = 4{,}05$, $\eta = 18{,}2$)

Costes: $C_p = 50$ (Preventivo), $C_c = 250$ (Correctivo)

Políticas: Basada en calendario vs. basada en la edad



Conclusión clave: El modelo generado por IA muestra que la política basada en la edad alcanza un coste esperado menor, con intervalos óptimos alrededor de 9,8 días (basada en la edad) y 9,3 días (basada en calendario).

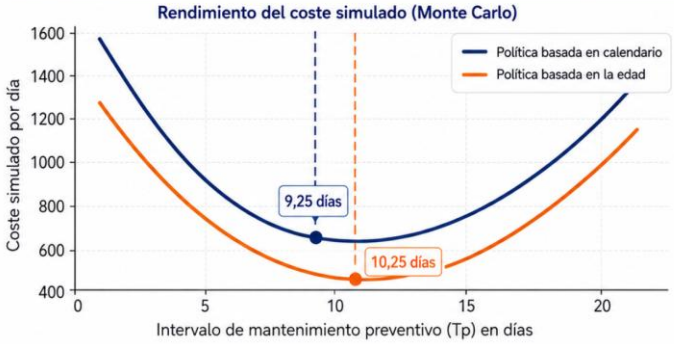
10

Parte 2. La estrategia asistida por IA

Estudio de caso – Parte 3: Validación empírica mediante simulación de Monte Carlo

Objetivo: Verificar los resultados analíticos utilizando un enfoque basado en simulación para modelar el comportamiento estocástico a largo plazo.

Resumen del prompt: ¿Podríamos optimizar el mismo problema utilizando un procedimiento empírico (simulación de Monte Carlo) en lugar del enfoque analítico?



La simulación **confirma** los resultados analíticos, identificando intervalos y costes óptimos **prácticamente idénticos.**

Óptimo basado en calendario ≈ 9,25 días

Óptimo basado en la edad ≈ 10,25 días

Esto genera **confianza en la metodología** y demuestra la **flexibilidad de la IA** para utilizar diferentes enfoques de optimización.

11

CMC CHILE 2026

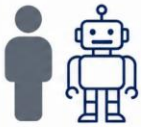
Parte 3. La frontera de la autonomia

De una herramienta de IA a un sistema de IA



Incluso una herramienta poderosa de IA sigue requiriendo que un operador humano formule las preguntas e implemente las respuestas. El verdadero cambio de paradigma es pasar de un **proceso asistido por IA** a uno **autónomo**. Este es el papel de la **IA agéntica**.

Asistido por IA (GenAI)



Humano pregunta a la IA → La IA proporciona análisis → El humano decide e implementa

Soporte de decisiones interactivo y bajo demanda.

Autónomo (IA agéntica)



El sistema percibe cambios → Los agentes colaboran → El sistema implementa/ recomienda

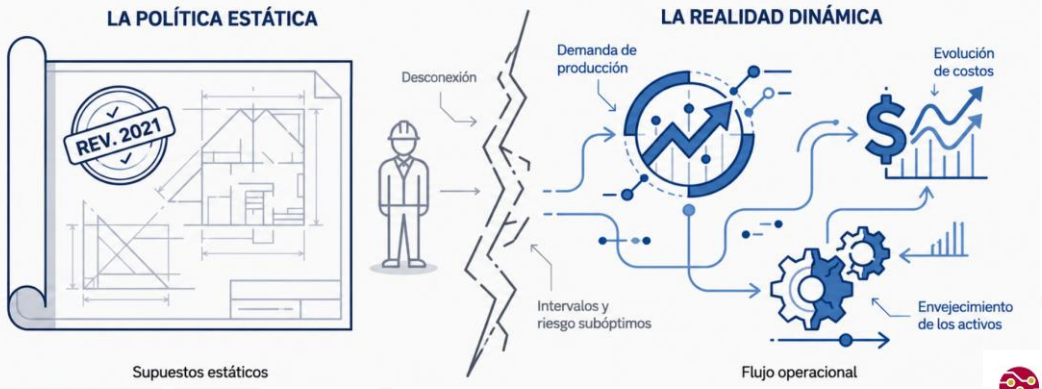
Gobernanza persistente, continua y en circuito cerrado.

12

Parte 3. La frontera de la autonomia

Las políticas de mantenimiento preventivo son planos estáticos en un mundo dinámico

- Los programas actuales de mantenimiento preventivo (PM) se revisan de manera episódica, a menudo solo cada pocos años, basados en supuestos estáticos y recursos de ingenieriá limitados.
- Sin embargo, los entornos industriales están en constante cambio: los regímenes de producción, los costos y los activos evolucionan continuamente.
- Esta desconexión hace que los intervalos de PM estáticos rápidamente se vuelvan subóptimos, lo que conduce a costos excesivos, tiempo de inactividad innecesario o mayor riesgo de falla.

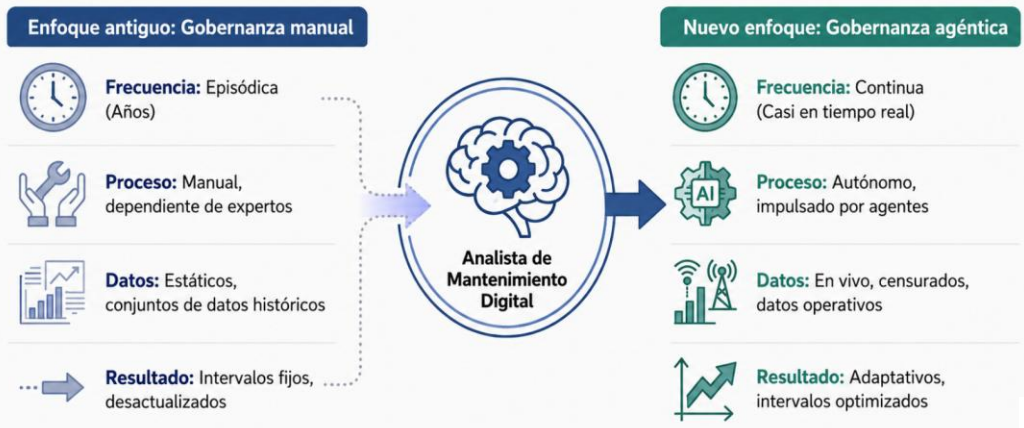


13

Parte 3. La frontera de la autonomia

Proponemos un nuevo paradigma: un 'Analista de Mantenimiento Digital' para la gobernanza continua de políticas

Pasamos de revisiones episódicas y manuales a un ciclo de toma de decisiones persistente y autónomo que alinea continuamente la política de mantenimiento con la realidad operativa.



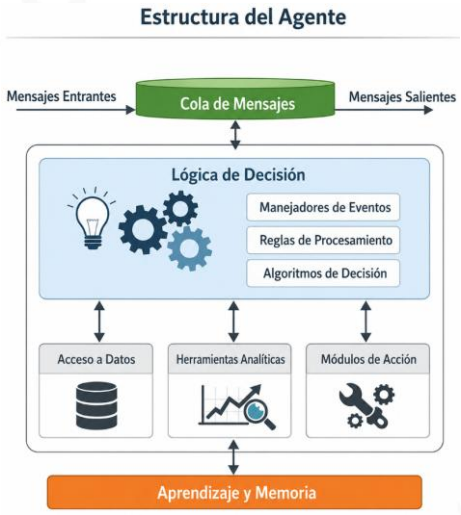
14

Parte 3. La frontera de la autonomia



15

Parte 3. La frontera de la autonomia



- **Cola de mensajes asíncrona:** desacopla el agente y habilita eventos.
- **Lógica de decisión:** evalúa el estado y selecciona acciones.
- **Repositorios y analítica:** consulta datos y ejecuta modelos.
- **Módulos de acción:** generan mensajes para otros agentes.
- **Memoria y aprendizaje:** almacenan resultados y mejoran el comportamiento.

16

Parte 3. La frontera de la autonomia

Conoce a tu equipo de Analistas Digitales de Mantenimiento

Un sistema de IA agéntica funciona como un equipo dedicado de especialistas digitales, cada uno con un rol claro. Colaboran continuamente para monitorear, analizar y gobernar las políticas de mantenimiento en un ciclo cerrado, automatizando todo el ciclo de revisión de políticas.



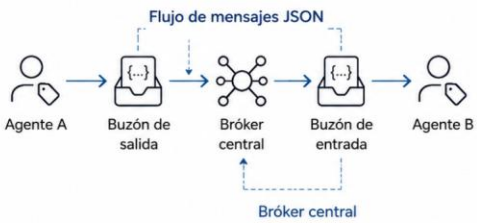
17

Parte 3. La frontera de la autonomia

Todas las interacciones son asíncronas y trazables, garantizando un registro de decisiones auditable

Mensajería asíncrona

Los agentes se comunican mediante mensajes JSON estructurados a través de un bróker central. Este diseño fomenta el desacoplamiento y emula arquitecturas industriales modernas orientadas a eventos.



Trazabilidad a nivel de "tick"

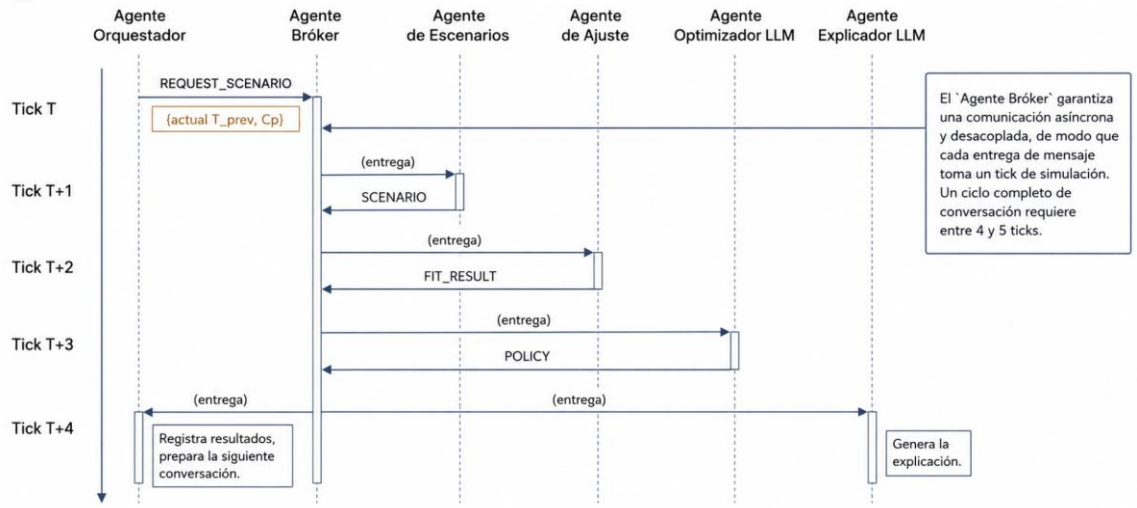
El sistema opera sobre una línea de tiempo discreta. Cada acción y mensaje queda registrado con marca temporal, permitiendo reconstruir completamente cualquier decisión de política.

TICK 1:	Orchestrator -> REQUEST_SCENARIO
TICK 2:	Broker -> Entrega REQUEST_SCENARIO
TICK 3:	ScenarioAgent -> SCENARIO
TICK 4:	Broker -> Entrega SCENARIO
...	

Esto garantiza que, ante cualquier decisión, podamos responder con precisión: ¿Quién sabía qué, y cuándo?

18

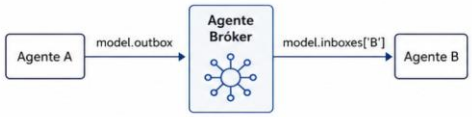
Parte 3. La frontera de la autonomia



19

Parte 3. La frontera de la autonomia

AGENTES BRÓKER PARA COMUNICACIONES AUTÓNOMAS



Los agentes están completamente desacoplados. Se comunican exclusivamente enviando mensajes JSON a través de un Bróker central.

El Bróker introduce un retardo de un tick, emulando redes de comunicación asíncronas del mundo real.

```
{
  "sender": "orquestador",
  "receiver": "escenario",
  "type": "REQUEST_SCENARIO",
  "conversation_id": "uuid-...",
  "timestamp": 1764952659.123,
  "payload": {
    "new_T_prev": 25.0,
    "Cp": 50.0
  }
}
```

- Identifica el agente de origen.
- Especifica el agente de destino.
- Define el propósito o acción del mensaje.
- Contiene los datos específicos y parámetros de la tarea.

Cada paso de tiempo discreto ('tick') queda registrado.

Tick	Conv	Evento(s)
9	3	**Orquestador**: inicia conversación 3, T_prev=22.81, Cp=63.3
10	3	**Escenario**: genera escenario (conv 3), beta_true=2.00, T_prev=22.81
11	3	**Ajuste**: ajusta Weibull, beta_hat=1.95, eta_hat=21.03
12	3	**Optimizador LLM**: política=calendar_based, T_opt=21.55, Cp=63.3
13	3	**Explicador LLM**: genera explicación (política=calendar_based...)
13	3	**Orquestador**: finaliza conversación 3, política=calendar_based, T_opt=21.55

El retardo de un tick entre agentes es claramente visible.

Múltiples agentes pueden actuar dentro del mismo tick.

20

Parte 3. La frontera de la autonomia

El Ciclo de Gobernanza Autónoma: Un Sistema que Aprende Continuamente

A diferencia de una revisión manual, el sistema agéntico opera en un bucle de retroalimentación persistente. La decisión de política en un ciclo alimenta directamente los datos recolectados para el siguiente, lo que permite al sistema adaptarse de forma autónoma a los cambios en los regímenes de falla o en las condiciones económicas.



Este no es un análisis único; es un proceso autónomo, repetible y auditable.

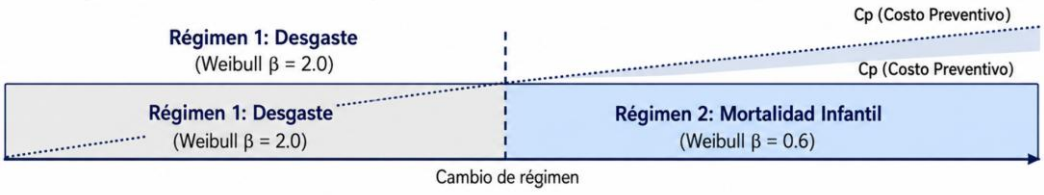
21

Parte 3. La frontera de la autonomia

Probamos el Sistema en una Simulación Dinámica Reflejando Desafíos Industriales Reales

El entorno de simulación introduce dos fuentes de no estacionariedad para evaluar el comportamiento adaptativo del sistema:

1. **Cambio de régimen de falla:** A mitad de la simulación, el comportamiento subyacente de falla cambia de un régimen dominado por desgaste a uno dominado por mortalidad infantil.
2. **Evolución de la estructura de costos:** El costo del mantenimiento preventivo (Cp) se incrementa progresivamente en el tiempo para reflejar condiciones económicas cambiantes.

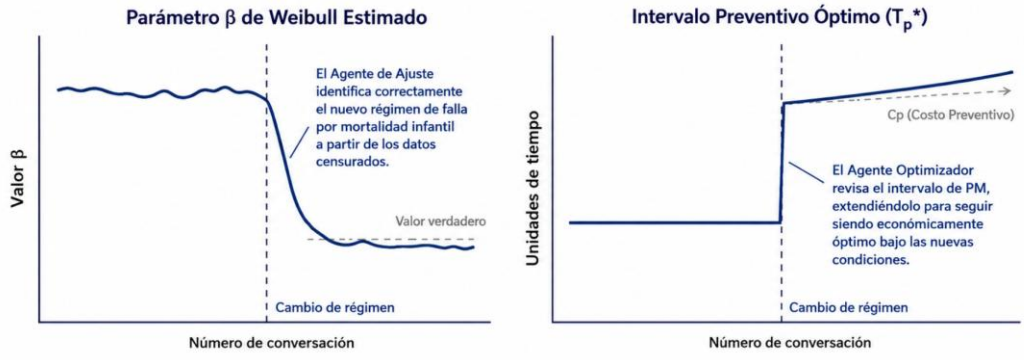


¿Puede el sistema adaptar autónomamente su política de mantenimiento cuando tanto el comportamiento físico del activo como su contexto económico están cambiando?

22

Parte 3. La frontera de la autonomia

El Sistema Detecta Autónomamente Cambios de Régimen y Ajusta la Política en Consecuencia



Esto demuestra la capacidad del sistema para alinear la política con las realidades físicas y económicas cambiantes en tiempo real.

23

Parte 3. La frontera de la autonomia

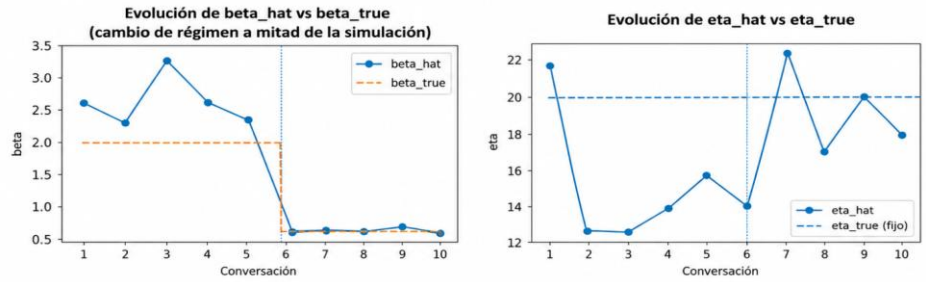
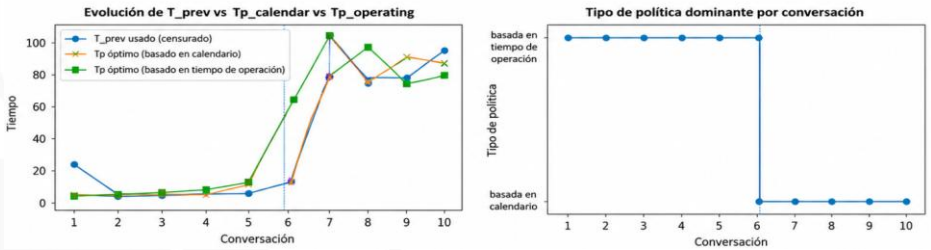


Figura 6: Estimación del parámetro beta de Weibull por el Agente de Ajuste y cambios de régimen

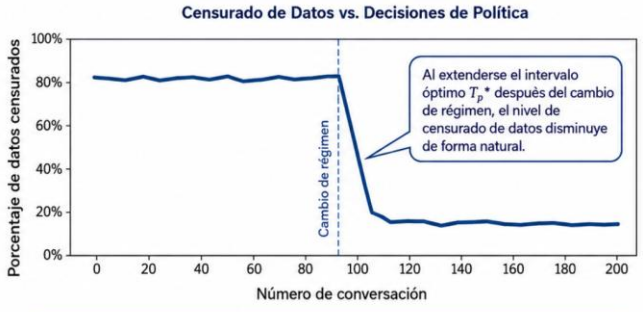


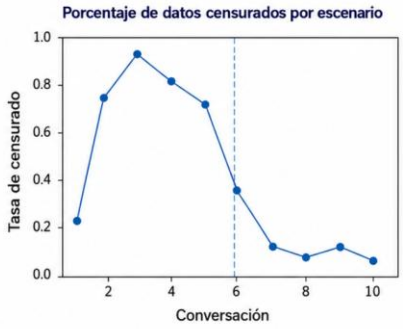
24

Parte 3. La frontera de la autonomia

La Decisión de Política en un Ciclo Informa Directamente los Datos para el Siguiente

El sistema gestiona un bucle de retroalimentación crítico: el intervalo de mantenimiento (T_p) elegido determina el censurado de los datos, y esos datos censurados se utilizan luego para reestimar el modelo de confiabilidad que informará la próxima decisión de intervalo de mantenimiento.





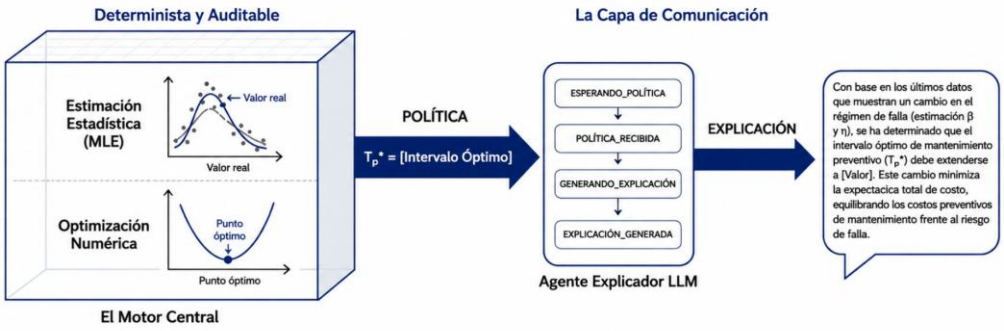
Esto demuestra un comportamiento **realmente adaptativo.** El sistema no solo reacciona a los datos; **influye activamente en los datos** que verá en el futuro a través de sus propias decisiones.

25

Parte 3. La frontera de la autonomia

La Optimización Determinista Impulsa las Decisiones; los LLMs Proporcionan la Narrativa

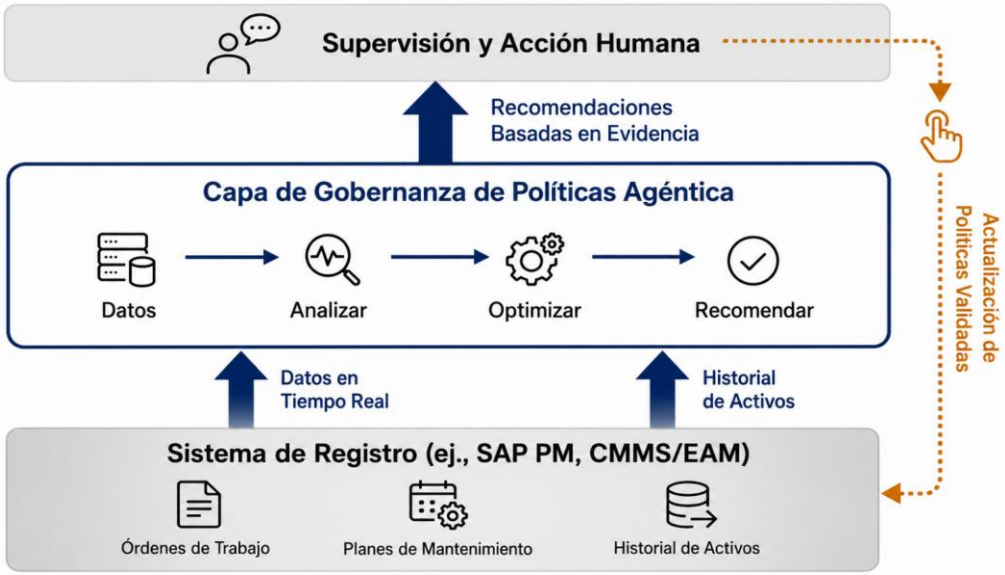
El sistema mantiene una separación estricta de responsabilidades. La **selección** de la política se realiza exclusivamente mediante estimación estadística auditable y optimización numérica. Los LLMs se limitan a traducir esta evidencia cuantitativa en explicaciones comprensibles para las personas.



"Los LLMs deben actuar como intérpretes y comunicadores, no como reemplazos de modelos analíticos validados."

26

Parte 3. La frontera de la autonomia



27

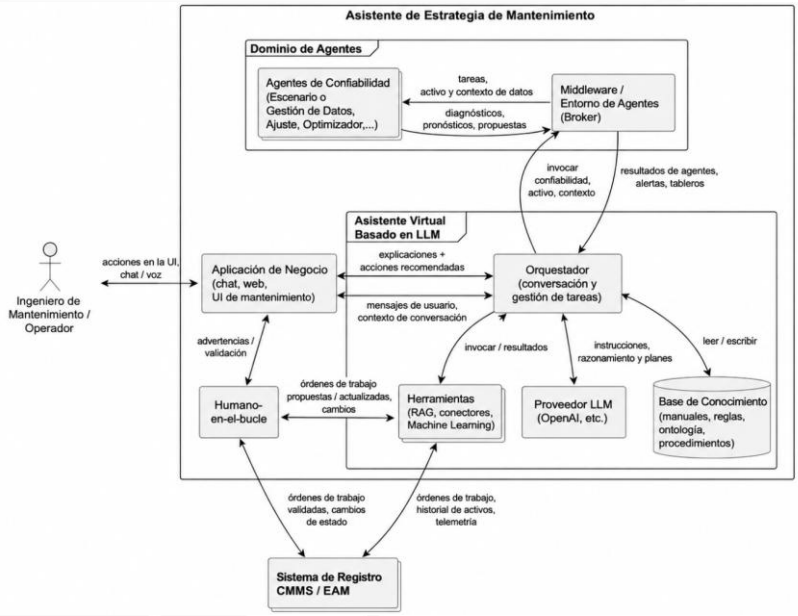
Parte 3. La frontera de la autonomia

Los Agentes Académicos se Transforman en Funciones Industriales Robustas

Agente en el Modelo Académico	Contraparte y Función en la Industria
Scenario Agent *(Icono: Base de datos/CMMS)*	**Agente de Datos CMMS:** Ingiere y limpia órdenes de trabajo reales e historiales de fallas desde SAP PM u otros EAMs.
Fitting Agent *(Icono: Curva de campana)*	**Agente de Ajuste:** Realiza MLE de Weibull sobre datos censurados del mundo real para capturar patrones reales de degradación.
Optimizer Agent *(Icono: Calculadora/Engranajes)*	**Agente Optimizador:** Utiliza costos reales de mantenimiento preventivo (Cp) y correctivo (Cc) de la planta para recomendar ajustes de intervalos.
Orchestrator Agent *(Icono: Batuta de director)*	**Módulo Orquestador:** Programa evaluaciones periódicas de política (p. ej., semanal, mensual) y coordina el flujo completo de extremo a extremo.
Explainer Agent *(Icono: Burbuja de chat/LLM)*	**Módulo LLM (Explicador):** Genera justificaciones en lenguaje natural listas para auditoría para ingenieros, gerentes y reguladores.

28

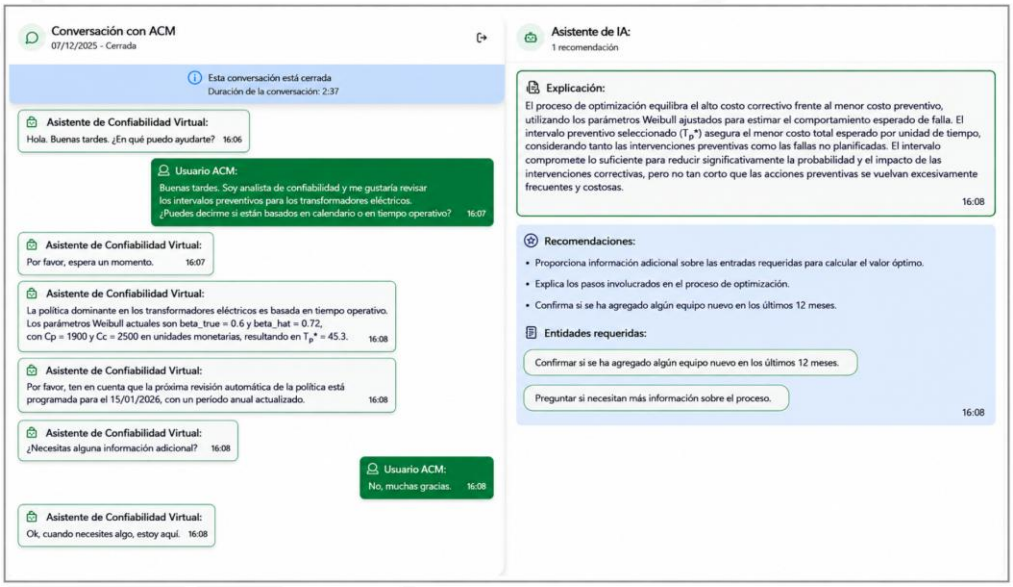
Parte 3. La frontera de la autonomia



La arquitectura del sistema

29

Parte 3. La frontera de la autonomia



30

Parte 3. La frontera de la autonomia

La Gobernanza Autónoma Transforma el Mantenimiento de un Centro de Costos Estático a una Función Dinámica y Estratégica

De Documentos Estáticos a Artefactos Vivos

Las políticas de mantenimiento ya no están fijas sino que se validan continuamente frente a evidencia del mundo real.

De Análisis Repetitivos a Supervisión Estratégica

Libera a los ingenieros de confiabilidad de recalculaciones manuales para que se enfoquen en objetivos de mayor nivel como la gestión de riesgos, la optimización a nivel de sistema y la alineación con los objetivos del negocio.

De Precedentes Históricos a Justificación Basada en Evidencia

Cada decisión de política se respalda con una trazabilidad de datos, modelos y razonamiento económico transparente y auditable, lo que soporta la gobernanza y el cumplimiento regulatorio.



31

Parte 3. La frontera de la autonomia

Conclusiones Clave y Reflexiones Finales

- La transformación digital es un fundamento necesario, no el objetivo final. La conectividad de datos **habilita la visibilidad, pero el valor se crea solo cuando los datos se transforman en inteligencia.**
- El **mantenimiento inteligente evoluciona hacia un proceso continuo, impulsado por valor** y alineado con los objetivos del negocio.
- **La IA aumenta la experiencia humana antes de reemplazar decisiones.** Las estrategias asistidas por IA mejoran la planificación, la priorización y la optimización mientras mantienen a las personas en el centro.
- **El verdadero avance proviene de la gobernanza autónoma.** Los sistemas de IA basados en agentes permiten la ejecución continua de políticas, el aprendizaje y la adaptación a escala.
- **De herramientas a sistemas: la inteligencia surge de la orquestación.** El valor se genera cuando los datos, los análisis, los agentes y los mecanismos de gobernanza funcionan como un ecosistema integrado.
- **El futuro del mantenimiento es adaptativo, explicable y de mejora continua.** Los sistemas inteligentes deben aprender de los resultados, garantizar la trazabilidad y evolucionar con los contextos de activos y de negocio.
- **Las organizaciones que dominen esta transición obtendrán una ventaja competitiva sostenible.** El mantenimiento inteligente impacta directamente en la disponibilidad, la eficiencia de costos, la reducción de riesgos y la resiliencia a largo plazo.

32


SESIÓN 24
ESCANEA EL CÓDIGO QR
RESPONDE UNA BREVE ENCUESTA
CONGRESO DE MANTENIMIENTO & CONFIABILIDAD CHILE
7ª EDICIÓN
¡GRACIAS!
Adolfo Crespo

33