

GEMELOS DIGITALES ORGANIZATIVOS: DE LA FRAGMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS A UNA GOBERNANZA INTEGRAL

Alfonso Díez. Fundador y CEO

UGROUND Global SL · España

RESUMEN

El sector cerámico opera con docenas o cientos de aplicaciones, repositorios de datos y hojas de cálculo que coexisten sin una visión integrada del negocio. La digitalización ha multiplicado la cantidad de datos disponibles, pero ha agravado la fragmentación: cada sistema habla su propio idioma, y el conocimiento real de cómo funciona la empresa reside en las personas, no en la arquitectura tecnológica. Este artículo propone una arquitectura organizativa de gemelo digital estructurada en tres capas semánticamente diferenciadas: la pila tecnológica existente (L1), una única fuente de veracidad ontológica (L2, SST) y un nivel de gobernanza transversal con capacidad de automatización inteligente (L3). Sostiene que esta separación en tres capas no es una elección de diseño, sino una necesidad estructural; describe ECMIA como una implementación concreta de este patrón y lo ilustra con el caso de un holding de distribución del sector químico que está aplicando esta arquitectura para cambiar su modelo de gestión.

1. EL PROBLEMA: LA EMPRESA CERÁMICA COMO UN SISTEMA DE SISTEMAS FRAGMENTADOS

Hoy en día, una empresa cerámica de tamaño medio funciona como un sistema de sistemas: sistemas ERP de gestión financiera, uno o varios sistemas MES, plataformas de control de calidad, herramientas de mantenimiento, sistemas de gestión documental, aplicaciones de planificación de la producción, plataformas de comunicación interna y, como sustrato invisible pero omnipresente, decenas o centenares de hojas de cálculo que cubren las lagunas que ninguna aplicación aborda adecuadamente. A esto se suman los sistemas de proveedores, clientes y operadores logísticos con los que la empresa intercambia información de forma más o menos estructurada. La bibliografía sobre el IIoT (Internet industrial de las cosas), la transformación digital en la producción y la fabricación inteligente muestra que esta proliferación de dispositivos, aplicaciones y servicios digitales aumenta la capacidad de captura de datos, pero también eleva la complejidad de integrar, coordinar y gestionar la información [12][13][14].

El resultado no es un sistema integrado. Es un conjunto de sistemas que coexisten, cada uno con su propio modelo de datos, su propia semántica y su propio ciclo de actualización. Un pedido de un cliente puede ser una entidad en el ERP, otra en el MES, otra en el sistema de calidad y otra en la hoja de cálculo de Excel que utiliza el jefe de producción para planificar la semana. No se trata de la misma entidad representada de cuatro formas diferentes: son representaciones parciales, desalineadas y, a menudo, incoherentes de una realidad operativa que ningún sistema capta por completo. Este tipo de heterogeneidad es precisamente uno de los problemas que la bibliografía sobre grafos de conocimiento y tecnologías semánticas identifica como una condición estructural de los entornos industriales digitalizados [15][16].

Esta situación tiene consecuencias directas en la capacidad de toma de decisiones. Cuando surge un problema en la cadena de suministro, cuando hay que abordar un cambio normativo o cuando la dirección necesita una visión consolidada del rendimiento operativo, la respuesta habitual es convocar una reunión, recopilar datos de múltiples fuentes y construir manualmente una visión que no existe de forma automática. El conocimiento de cómo funciona realmente la empresa reside en las personas, no en la arquitectura tecnológica. Si esas personas se marchan, el conocimiento se pierde, se degrada o queda limitado a procedimientos informales. Los estudios sobre los grafos de conocimiento en el sector manufacturero señalan precisamente que la fusión de conocimientos, la contextualización semántica y la trazabilidad de entidades y relaciones son necesidades recurrentes para avanzar hacia una Industria 4.0 más flexible y gestionable [16].

No se trata de un problema nuevo, ni exclusivo del sector cerámico. Lo que caracteriza al momento actual es la magnitud del problema y la urgencia de resolverlo. La presión competitiva global, la volatilidad de la cadena de suministro, los requisitos de trazabilidad y sostenibilidad, y el auge de la inteligencia artificial como herramienta operativa han convertido la fragmentación de los sistemas en una limitación estratégica. Los marcos recientes de gobernanza de datos y los informes sobre la adopción de la IA en las empresas insisten en que la capacidad de generar valor mediante el análisis y la inteligencia artificial depende de disponer de datos gobernados, coherentes y utilizables a gran escala [1][2]. En el ámbito de la logística y la cadena de suministro, la bibliografía reciente sobre gemelos digitales subraya asimismo la necesidad de modelos integrados, transparentes y resilientes que respalden la toma de decisiones en entornos dinámicos y con múltiples actores [17][18]. Las empresas que no sean capaces de construir una visión integrada de sus operaciones se enfrentarán a dificultades

cada vez mayores para competir en entornos que exigen respuestas rápidas, trazables y bien fundamentadas.

2. PORQUÉ FALLAN LOS ENFOQUES ACTUALES

Ante este diagnóstico, las organizaciones llevan años probando diferentes respuestas. La más habitual ha sido la integración punto a punto: conectar sistemas a través de API, *middleware* (capa de conectividad) o desarrollos a medida para que puedan compartir datos. Este enfoque mejora la sincronización operativa, pero no resuelve el problema subyacente: cada integración requiere el mapeo de dos modelos de datos diferentes, con reglas de transformación específicas y dependencias técnicas que se acumulan con el tiempo. Este déficit de integración aparece de forma recurrente en los diagnósticos del sector sobre la conectividad empresarial [3]. Además, la bibliografía sobre la transformación digital en la producción y sobre el IIoT muestra que la conectividad es una condición necesaria, pero no suficiente, cuando los sistemas conectados siguen conservando modelos semánticos locales y no existe una representación compartida del negocio [13][14].

Una segunda respuesta ha sido la implantación de plataformas de inteligencia de negocio, almacenes de datos corporativos o *data lakes* (lagos de datos). Estas soluciones resultan útiles a nivel analítico, pero suelen operar con datos históricos o consolidados con fines de observación, no con la realidad operativa en tiempo real. En otras palabras, ayudan a ver lo que ha sucedido, pero no bastan para gestionar procesos transversales, ejecutar políticas corporativas o actuar de forma coordinada entre múltiples sistemas de origen. La bibliografía sobre grafos de conocimiento establece una distinción precisa entre los repositorios de datos analíticos y los modelos semánticos capaces de representar entidades, relaciones, contexto y reglas de interpretación, lo que permite razonar sobre información heterogénea en lugar de limitarse simplemente a almacenarla [15][16].

La tercera respuesta, cada vez más habitual, es la adopción de soluciones de inteligencia artificial: copilotos, asistentes conversacionales, modelos predictivos aplicados a procesos específicos o mecanismos de recomendación. Estas herramientas pueden generar valor real en casos de uso delimitados, pero amplifican el problema estructural cuando se implementan en una arquitectura fragmentada. La calidad de la IA depende directamente de la calidad, la coherencia y la trazabilidad de los datos que la alimentan; por lo tanto, sin gobernanza de datos no hay una IA fiable [1][4]. En los enfoques de gemelos digitales, la IA no se concibe como un sustituto del modelo de conocimiento, sino como una capacidad que opera sobre una representación semántica explícita del dominio, capaz de contextualizar entidades, procesos, relaciones y alternativas de decisión [19].

Una metáfora puede ayudarnos a comprender mejor esta situación. Podemos imaginar la empresa con la forma de la letra π . Las líneas verticales son las aplicaciones de silos locales (ERP, CRM, etc.) que resuelven funciones atómicas (emitir una factura, pagar las nóminas, registrar un pedido, etc.). La línea horizontal representa las funciones integradas o corporativas, que conectan las funciones verticales y se ocupan de procesos de segundo orden (optimización del flujo de caja, aumento de la penetración en el mercado, rediseño de los flujos logísticos, etc.). Los procesos de segundo orden tienen su propia lógica interna y semántica; no son meramente una interconexión de funciones locales, ni pueden resolverse con agentes de IA. Es más, son clave para el éxito de la empresa en cuanto a resiliencia y capacidad competitiva.

3. LA SEPARACIÓN EN TRES CAPAS ES UNA NECESIDAD SEMÁNTICA

La propuesta de estructurar la arquitectura del conocimiento empresarial en tres capas es una consecuencia de la naturaleza semántica del problema: cada capa representa un tipo distinto de conocimiento, con propiedades, alcance y requisitos técnicos radicalmente diferentes. Se trata de una forma de transformar digitalmente una organización mediante un enfoque de ingeniería de sistemas basada en modelos (*Model-Based Systems Engineering*), MBSE, estableciendo una separación explícita entre el modelo operativo (lo que hace el sistema), el modelo semántico (lo que el sistema sabe sobre sí mismo) y el modelo de gobernanza (las reglas que determinan cómo debe comportarse el sistema). Esta distinción, desarrollada en el contexto de la ingeniería de sistemas complejos, es directamente aplicable al problema de la arquitectura empresarial [5].

Otra fuente de inspiración para este enfoque de modelización es la ingeniería de sistemas de sistemas (*Systems of Systems Engineering*), SoSE. Dentro de este marco, entendemos la organización no como una máquina determinista, sino como un sistema adaptativo complejo, cuyos diferentes subsistemas evolucionan en busca de diversos patrones de equilibrio. La organización en tres capas permite preservar la independencia operativa de los subsistemas, al tiempo que mantiene la coordinación y el equilibrio a nivel del sistema global [10].

3.1. Capa L1: Modelos de dominio local

La pila tecnológica existente (ERP, MES, sistemas de calidad, CRM, hojas de cálculo, documentos, etc.) define una semántica de alcance específico. Cada sistema representa correctamente la realidad de su ámbito funcional, pero no pretende, ni puede, representar la visión integrada de la empresa. Un sistema de gestión de almacenes modeliza correctamente las ubicaciones, las referencias y los movimientos, pero no tiene conocimiento alguno de cómo esas existencias afectan a los compromisos comerciales, a la planificación de la producción o a los indicadores financieros. Esta limitación no es un defecto de diseño, sino una consecuencia natural de la especialización funcional.

El error estratégico más frecuente consiste en intentar ampliar estos modelos locales para cubrir necesidades transversales, ya sea mediante personalizaciones del ERP, desarrollos a medida o la acumulación de integraciones punto a punto. El resultado es siempre el mismo: sistemas sobrecargados, frágiles y de mantenimiento costoso que, aun así, no logran resolver el problema subyacente.

3.2. Capa L2: La fuente única de veracidad ontológica (SST)

Ningún modelo L1 pretende representar la visión integrada de forma ontológica de la empresa, ya que esa no es su función. Para construir esa visión se requiere una capa intermedia diseñada específicamente para ello: la fuente única de veracidad (SST). Esta capa no replica los datos de los sistemas de origen, sino que actúa como una capa semántica sobre ellos, integrando representaciones parciales en un modelo coherente en el que cada entidad empresarial, cliente, pedido, proveedor, activo o proceso existe una sola vez con su significado completo y sus relaciones trazadas. El modelo de diseño (la ontología) que implementa la SST es corporativo, no departamental, e incorpora específicamente características de gobernanza de datos como el origen, la explicabilidad, el estado, la versión y el control de cambios.

La SST requiere una infraestructura técnica específica que no es equivalente a una base de datos relacional convencional ni a un almacén de datos. Debe ser agnóstica con respecto a los modelos de datos de origen (SQL, NoSQL, archivos, API), capaz de representar relaciones

semánticas complejas y, en el contexto actual, vectorizada para permitir la búsqueda semántica y el razonamiento sobre el contenido mediante técnicas de IA generativa. En la literatura sobre gestión del conocimiento, este tipo de repositorio se denomina grafo de conocimiento enriquecido con capacidades semánticas [15][16].

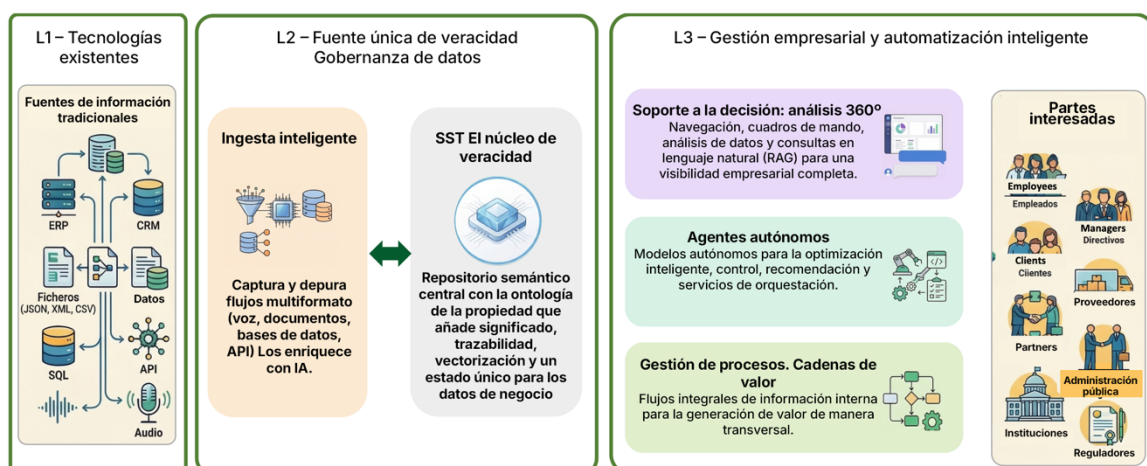
3.3.Capa L3: Gobernanza transversal y automatización inteligente

La capa L3 representa la categoría de conocimiento empresarial que no pertenece a ningún sistema de la capa L1 y que tampoco puede resolverse únicamente mediante una mejor representación de los datos. Es la capa transversal de π . Por ejemplo: (1) una política de crédito que afecta simultáneamente a ventas, finanzas y logística; (2) un criterio de calidad que determina tanto la aceptación de las materias primas como la clasificación del producto acabado; (3) un procedimiento de respuesta ante la falta de existencias que implica a compras, producción y atención al cliente.

Estas reglas no existen en ningún sistema porque a) quedan fuera del ámbito de aplicación de cualquier sistema individual, o b) requerirían modificar múltiples sistemas con un coste, un riesgo y una complejidad de mantenimiento que ninguna organización está dispuesta a aceptar. El resultado es que residen en procedimientos documentados, en el conocimiento tácito de las personas o, simplemente, no se aplican de forma coherente.

La capa L3 es el espacio en el que estas reglas transversales pueden modelizarse, aplicarse y evolucionar sin intervenir en los sistemas de origen. Su concepción es integral, no vertical: puede gestionar simultáneamente información y reglas de negocio que abarquen cualquier aspecto de la organización. Aquí es donde reside la automatización inteligente, el apoyo a la toma de decisiones y la capacidad de gestión de procesos transversales que caracterizan a un gemelo digital organizativo maduro.

La capa L3 da soporte a las partes interesadas: empleados, directivos, clientes, proveedores, socios, administraciones públicas, organismos reguladores, etc. Este soporte se estructura en torno a tres servicios principales: **el apoyo a la toma de decisiones** (consultas, cuadros de mando, análisis de datos y búsqueda en lenguaje natural basada en RAG); **agentes autónomos** capaces de tomar decisiones inteligentes sobre el negocio y los eventos, y de generar flujos de datos hacia las capas L2 y L1; y la gestión de **procesos de negocio** transversales, basados en los casos identificados en la capa L2.



4. MODELO DE GOBERNANZA BASADO EN UNA ARQUITECTURA DE TRES CAPAS: ECMIA COMO IMPLEMENTACIÓN DE REFERENCIA

La separación en tres capas descrita en el apartado anterior no es una propuesta teórica sin fundamento práctico, sino un patrón arquitectónico que puede materializarse en diferentes implementaciones. Lo que determina la viabilidad de cualquier implementación concreta es la capacidad de mantener la coherencia semántica a lo largo de las tres capas: que la L1 siga siendo el sistema operativo de registro; que la L2 sea realmente una representación ontológica corporativa y no un almacén de datos renombrado; y que la L3 opere sobre reglas de negocio externalizadas, y no sobre la lógica integrada en las aplicaciones.

La Arquitectura Inteligente de Control y Gestión Empresarial (*Enterprise Control & Management Intelligent Architecture*), ECMIA, es una implementación de este patrón desarrollada por UGROUND. Su estructura de tres capas se corresponde exactamente con la separación semántica descrita. El componente que articula las tres capas es ROSE, un motor ontológico basado en la ingeniería semántica recursiva [7] que actúa como un gemelo digital. ROSE no forma parte de ninguna de las capas: gestiona la adquisición de información desde la L1 hacia la SST, la construcción y el mantenimiento del modelo ontológico en la L2, y la explotación de dicho modelo en la L3 a través de tres aplicaciones principales: apoyo a la toma de decisiones, gestión de procesos y automatización agéntica.

Una característica relevante de esta arquitectura es su naturaleza no invasiva: al desplegarse como una capa semántica sobre los sistemas existentes sin sustituirlos ni modificarlos, el coste de adopción se reduce significativamente en comparación con las iniciativas de sustitución de plataformas, y los primeros casos de uso pueden estar operativos en un plazo relativamente corto. Esta característica es una consecuencia directa de la separación entre capas: la L1 permanece inalterada porque la semántica corporativa reside en la L2, no en los sistemas fuente.

4.1. El papel de la IA en la arquitectura

Un aspecto relevante de esta arquitectura es la concepción del papel de la inteligencia artificial. En muchos proyectos de transformación digital, la IA se presenta como el producto, el copiloto, el asistente, el agente, la solución. En una arquitectura de tres capas como la descrita, la IA es una herramienta que opera en múltiples puntos; no es el eje central.

En la capa de adquisición (L1→L2), se aplica la IA para enriquecer y clasificar la información: extracción de entidades, resolución de inconsistencias semánticas y vinculación de objetos entre los distintos sistemas de origen. En la SST (L2), la vectorización semántica permite realizar búsquedas y razonamientos sobre el contenido del repositorio. En la capa de explotación (L3), la IA interviene en las tres aplicaciones: generando análisis y recomendaciones en el apoyo a la toma de decisiones y permitiendo la explotación de ontologías mediante el uso del lenguaje natural en las interfaces de usuario, orquestando flujos en la gestión de procesos y ejecutando tareas autónomas dentro de los límites definidos por las reglas de negocio en la automatización agéntica.

Esta distribución tiene una importante consecuencia práctica: la calidad de la IA depende directamente de la calidad del modelo ontológico. Un sistema de recomendación que opera sobre una SST bien construida con un grafo de conocimiento explícito produce resultados cualitativamente superiores en comparación con uno que opera sobre datos fragmentados y semánticamente incoherentes.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN UN HOLDING EMPRESARIAL

Para ilustrar el valor práctico de la arquitectura de tres capas, presentamos un caso real de aplicación a un holding corporativo. Este holding (del sector de la distribución química) está fragmentado en más de 20 empresas que operan en cuatro líneas de negocio interconectadas. Aunque gozan de independencia funcional, comparten numerosas sinergias en cuanto a proveedores, productos, almacenes, clientes, finanzas y procedimientos.

5.1. El problema en términos de la fragmentación

Su arquitectura L1 ha evolucionado a partir de un ERP original que se ha ido clonando con el paso del tiempo. Esta tecnología ha permitido el crecimiento del grupo, pero ha generado una carga cada vez mayor para la capacidad de gestionar el grupo como un sistema integral. El resultado es muy habitual: se han multiplicado las hojas de cálculo, la capacidad de toma de decisiones de los responsables se ve limitada por el acceso a los datos y su calidad, ciertos procesos clave carecen de la infraestructura adecuada y no se pueden aprovechar las sinergias entre las empresas. Ante esta realidad, la empresa tiene dos estrategias posibles: plantearse sustituir el ERP e incorporar varios sistemas verticales adicionales, o implementar un gemelo digital corporativo transversal que se base en lo que ya existe y genere todo el valor añadido que la empresa necesita.

5.2. La solución con el modelo de tres capas

Aplicada a esta realidad, la arquitectura de tres capas crea una representación unificada en la SST (L2) a partir de múltiples fuentes de información: por un lado, todos los sistemas ERP; y, además, hojas de cálculo de Excel, documentos PDF y una nueva interconexión con los bancos. Todas estas fuentes proporcionan información sobre proveedores, compras, clientes, ventas, bancos, productos, stock, precios, etc. Todas ellas son entidades relacionadas dentro de un único modelo ontológico, actualizado casi en tiempo real desde los sistemas fuente sin modificarlos.

Partiendo de esta SST, la capa L3 se encarga de los procesos transversales clave que quedan fuera del alcance de la L1. Los procesos considerados más importantes en el primer ciclo de desarrollo son:

- a) el modelo de toma de decisiones de gestión, tanto para el grupo como para cada una de las empresas;
- b) la optimización de los almacenes, integrando toda la información para obtener sinergias de grupo;
- c) el modelo de tesorería que integra bancos, previsiones de flujo de caja y simuladores;
- d) la gestión basada en presupuestos; y
- e) un nuevo modelo de compras que integra los procesos de aprovisionamiento del grupo junto con sus almacenes y existencias.

En un proceso de este tipo, los plazos y la dinámica de desarrollo son fundamentales. Deben ser procesos muy rápidos con un ciclo de diseño iterativo: pasar del tablero de diseño a las pruebas en modo MVP, seguidas de un perfeccionamiento continuo en ciclos sucesivos. No se trata del desarrollo tradicional en cascada, pero tampoco es una metodología ágil; se trata más bien de un modelo de perfeccionamiento iterativo en el que el diseño final gana en riqueza y matices con cada ciclo.

El plazo previsto para este proyecto es de seis meses de principio a fin, con un ciclo de cuatro implementaciones iterativas para generar valor empresarial mientras se realizan las inversiones.

6. VALIDACIÓN: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA INDUSTRIAL

La viabilidad de los gemelos digitales organizativos basados en ontologías no es una hipótesis. Está validada tanto por experiencias internacionales a gran escala como por aplicaciones en el mercado europeo. A nivel internacional, empresas como Microsoft, Google y SAP han anunciado nuevos productos basados en desarrollos ontológicos. Otra empresa, Palantir Technologies, constituye una referencia relevante para validar la escalabilidad del patrón ontológico en entornos altamente complejos. Su plataforma ha abordado problemas radicalmente diferentes sin cambiar la arquitectura subyacente: desde la optimización del mantenimiento de flotas de aviones hasta la gestión operativa de hospitales [6].

En el mercado europeo, UGROUND demuestra la aplicabilidad del patrón en entornos organizativos de diversa índole. Con más de quince años de implementaciones en entornos exigentes, su trayectoria abarca sectores tan diversos como la banca, los seguros, la industria, la distribución, la alimentación, la sanidad, la gestión de personal, las telecomunicaciones y la gestión de envíos, tanto en el sector privado como en el público. Esta diversidad sectorial es, en sí misma, una prueba del carácter transversal del patrón: la misma arquitectura de gemelo digital resuelve problemas de gobernanza del conocimiento en organizaciones con estructuras, procesos y sistemas fuente completamente diferentes.

7. PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL MODELO Y CONDICIONES DE IMPLEMENTACIÓN

La arquitectura de tres capas presenta un conjunto de propiedades estructurales que la distinguen de los enfoques de integración convencionales, precisamente porque cada capa hace lo que se espera de ella, y solo eso. Las propiedades más relevantes son:

Conservación de la pila tecnológica existente. Se conserva y mejora la inversión tecnológica acumulada. No hay riesgo de implementación operativa, migración de datos, ni sustitución de sistemas derivado de un cambio de plataforma.

Carácter no invasivo. Al funcionar como una capa semántica sobre los sistemas existentes, los primeros casos de uso pueden estar operativos en un plazo relativamente corto. El modelo se construye de forma incremental.

Agnosticismo tecnológico. La arquitectura se integra con cualquier sistema fuente, independientemente de su tecnología, antigüedad o proveedor. No crea dependencia alguna respecto a un ecosistema tecnológico específico.

Adaptabilidad en entornos de alta incertidumbre. El modelo ontológico puede evolucionar sin necesidad de reprogramar los sistemas. Cuando cambian las reglas de negocio, se actualiza el modelo en L3 o la ontología en L2, no el código de la aplicación.

La experiencia sugiere que el factor crítico de éxito no es tecnológico, sino organizativo: la voluntad de la empresa de emprender un proceso de integración de su modelo de gestión. Este proceso de captura del conocimiento organizativo tácito es, en sí mismo, uno de los activos

más valiosos generados por la implementación, independientemente de los beneficios operativos directos.

8. CONCLUSIÓN: DE LOS DATOS A LA GOBERNANZA EMPRESARIAL

La industria cerámica lleva años acumulando capacidades digitales: sensores, MES, análisis de datos e inteligencia artificial aplicada a procesos específicos. La pregunta que aún no tiene una respuesta satisfactoria en la mayoría de las organizaciones no es cómo digitalizar más, sino cómo hacer que todo lo que se ha digitalizado funcione como un sistema coherente.

La propuesta de este artículo parte de un diagnóstico estructural: la fragmentación de los sistemas no se resuelve con más integraciones ni con mejores herramientas de BI. Se resuelve reconociendo que los tres tipos de conocimiento empresarial –el conocimiento del ámbito operativo (L1), el conocimiento ontológico integrado (L2) y el conocimiento de gobernanza corporativa (L3)– tienen naturalezas diferentes y requieren capas arquitectónicas distintas. ECMIA es una implementación concreta de este patrón; el patrón en sí mismo tiene validez independientemente de cualquier implementación específica.

Esta separación no constituye una propuesta para añadir complejidad. Si cada capa hace lo que debe hacer, y solo eso, el conjunto se simplifica y resulta más fácil de mantener y más evolutivo. El modelo puede actualizarse a medida que cambia el negocio; la inteligencia artificial puede aplicarse allí donde genera valor real, sobre datos con significado y relaciones trazables; y las decisiones pueden tomarse con una visión completa, no a partir de fragmentos.

Este enfoque tiene un efecto de segundo orden crítico para las empresas: la madurez de su modelo de gestión. Este modelo pasa de un estado implícito (hojas de cálculo, reuniones) a uno explícito (capas de gestión, sistemas analíticos, información integrada, cuadros de mando corporativos, etc.), convirtiéndose en un factor clave en la evolución de la estrategia de las empresas.

9. REFERENCIAS

- [1] Gartner. Data and Analytics Governance Framework. 2025.
<https://www.gartner.com/en/data-analytics/topics/data-and-analytics-governance>
- [2] McKinsey & Company. The State of AI in 2025. McKinsey Global Institute, 2025.
- [3] MuleSoft / Salesforce. Connectivity Benchmark Report 2024.
<https://www.mulesoft.com/lp/reports/connectivity-benchmark>
- [4] Huyen, C. AI Engineering. O'Reilly Media, 2025. <https://www.oreilly.com/library/view/ai-engineering/9781098166298/>
- [5] Holt, J.; Perry, S. Implementing MBSE into Your Business – The Trinity Approach. INCOSE UK, 2020.
- [6] Palantir Technologies. Ontology-Driven Operations: Case Studies in Aerospace, Healthcare and Defense. Palantir White Paper, 2024.
<https://www.palantir.com/platforms/foundry/>

- [7] UGROUND Global SL. Recursive Ontology-Based Systems Engineering. US Patent US9760345B2. USPTO, 2017. <https://patents.google.com/patent/US9760345B2>
- [8] DAMA International. The DAMA Guide to the Data Management Body of Knowledge (DAMA-DMBOK2). Technics Publications, 2017.
- [9] INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th ed. Wiley, 2015.
- [10] Boyes, H.; Hallaq, B.; Cunningham, J.; Watson, T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12, 2018.
- [11] Brauner, P.; Dalibor, M.; Jarke, M.; Kunze, I.; Koren, I. A Computer Science Perspective on Digital Transformation in Production. *ACM Transactions on Internet of Things*, 3(2), Article 15, 2022.
- [12] Hogan, A. et al. Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*, 54(4), Article 71, 2021.
- [13] Buchgeher, G.; Gabauer, D.; Martinez-Gil, J.; Ehrlinger, L. Knowledge Graphs in Manufacturing and Production: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 9, 55537–55554, 2021.
- [14] Le, T. V.; Fan, R. Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems. *Transportation Research Part E*, 179, 103315, 2023.
- [15] Zhang, J. et al. Supply Chain Digital Twin Framework Design. *Proceedings IEEE IEEM*, 2021.
- [16] Rožanec, J. M. et al. Actionable Cognitive Twins for Decision Making in Manufacturing. *International Journal of Production Research*, 60(2), 452–478, 2022.
- [17] Karabulut, E.; Pileggi, S. F.; Groth, P.; Degeler, V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review. *Future Internet*, 15(10), 335, 2023.