

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.2030>

Ingeniería dirigida por modelos para modernizar sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos complejas

Model-Driven Engineering for Modernizing Critical Legacy Systems in Data-Intensive and Complex Organizations

Maria Teodolinda Ortega Ovalle

maria.ortegao@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-3629-9751>

Universidad de Panamá
Panamá

Artículo recibido: 18 enero 2026-Aceptado para publicación: 20 febrero 2026
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La modernización de sistemas críticos legados representa un desafío para organizaciones intensivas en datos que requieren mayor agilidad, trazabilidad y capacidad de evolución. Estos sistemas suelen presentar altos niveles de deuda técnica, arquitecturas monolíticas y dificultades para integrarse con plataformas modernas. La Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) ofrece un enfoque sistemático para abordar estos problemas mediante modelos, metamodelos y transformaciones automáticas que permiten abstraer complejidad y mejorar la calidad estructural. Este artículo propone un marco metodológico basado en MDE para apoyar la modernización progresiva de sistemas críticos, integrando prácticas de modelado, repositorios colaborativos y transformaciones automatizadas. Los resultados esperados incluyen una reducción significativa de la deuda técnica, mayor trazabilidad entre artefactos y una mejora en la capacidad de evolución del sistema sin comprometer su estabilidad operativa.

Palabras clave: ingeniería dirigida por modelos, modernización de sistemas legados, deuda técnica, trazabilidad, metamodelos

ABSTRACT

The modernization of critical legacy systems is a major challenge for data-intensive organizations that require greater agility, traceability, and long-term evolvability. These systems often exhibit high levels of technical debt, monolithic architectures, and limited integration capabilities with modern platforms. Model-Driven Engineering (MDE) provides a systematic approach to address these issues through the use of models, metamodels, and automated transformations that abstract complexity and improve structural quality. This article proposes an MDE-based methodological framework to support the progressive modernization of critical systems, integrating modeling

practices, collaborative repositories, and automated transformations. Expected outcomes include a significant reduction of technical debt, improved traceability across artifacts, and enhanced system evolvability without compromising operational stability.

Keywords: model driven engineering, legacy system modernization, technical debt, traceability, metamodels

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La modernización de sistemas críticos legados se ha consolidado como una de las problemáticas más relevantes y complejas dentro de la Ingeniería de Software contemporánea. En organizaciones intensivas en datos, estos sistemas constituyen la columna vertebral de procesos operativos, regulatorios y estratégicos, lo que implica que cualquier intervención sobre ellos debe ejecutarse con un alto grado de precisión, control y garantía de continuidad. A lo largo de décadas, estos sistemas han evolucionado de manera incremental, acumulando heterogeneidad tecnológica, dependencias implícitas, estructuras monolíticas y niveles crecientes de deuda técnica que afectan su mantenibilidad, escalabilidad y capacidad de integración con arquitecturas modernas basadas en servicios, automatización y análisis avanzado.

La presión por adoptar tecnologías emergentes —como arquitecturas orientadas a servicios, plataformas cloud, analítica avanzada y automatización de procesos— ha intensificado la necesidad de modernizar estos sistemas sin comprometer su estabilidad operativa. Sin embargo, la modernización de sistemas críticos no puede abordarse mediante estrategias tradicionales de reescritura o reemplazo completo, debido al riesgo inherente de pérdida de funcionalidad, interrupción de servicios esenciales o degradación del rendimiento. Este escenario plantea un desafío científico y técnico de gran relevancia: ¿cómo modernizar sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos sin comprometer su estabilidad operativa, garantizando al mismo tiempo trazabilidad, calidad estructural y capacidad de evolución?

En este contexto, la Ingeniería Dirigida por Modelos (Model-Driven Engineering, MDE) emerge como un enfoque que permite elevar el nivel de abstracción, formalizar el conocimiento del sistema y automatizar actividades clave mediante modelos, metamodelos y transformaciones sistemáticas. La literatura especializada ha demostrado que MDE contribuye a gestionar la complejidad, mejorar la trazabilidad entre artefactos y reducir inconsistencias en sistemas de gran escala, lo que la convierte en una candidata sólida para apoyar procesos de modernización progresiva. No obstante, persiste un vacío en la aplicación de MDE específicamente orientada a sistemas críticos en entornos intensivos en datos, donde la estabilidad operativa y la integridad de la información son condiciones no negociables.

A partir de esta problemática, este artículo plantea como objetivo general proponer un marco metodológico basado en MDE que permita apoyar la modernización progresiva de sistemas críticos legados. Este objetivo se articula mediante objetivos específicos que incluyen: analizar los desafíos inherentes a la modernización de sistemas legados; evaluar el potencial de MDE para mejorar la trazabilidad, modularidad y automatización; diseñar un marco metodológico que integre modelos, metamodelos y transformaciones automáticas; y validar conceptualmente su aplicabilidad mediante un caso de referencia. La integración de estos elementos busca ofrecer una

contribución científica que permita avanzar en la comprensión y aplicación de MDE como estrategia para enfrentar la complejidad estructural y operativa de los sistemas críticos legados.

La introducción establece así el fundamento conceptual, metodológico y científico del estudio, justificando la pertinencia de MDE como enfoque para abordar la modernización de sistemas críticos en organizaciones intensivas en datos. Las secciones siguientes profundizan en el marco teórico, la metodología propuesta, los resultados esperados y la discusión académica que sustenta la contribución del artículo.

Marco teórico

La modernización de sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos requiere un marco conceptual robusto que permita comprender la complejidad inherente a estos sistemas, las limitaciones de los enfoques tradicionales de modernización y el potencial transformador de la Ingeniería Dirigida por Modelos (Model-Driven Engineering, MDE). Este marco teórico se estructura en cuatro ejes fundamentales: (1) la naturaleza y problemática de los sistemas críticos legados, (2) la deuda técnica como fenómeno estructural, (3) los principios y fundamentos de MDE, y (4) el rol de los modelos, metamodelos y transformaciones en procesos de modernización progresiva.

Sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos

Los sistemas críticos legados son plataformas tecnológicas que han evolucionado durante largos periodos y que soportan procesos esenciales para la operación institucional. Suelen caracterizarse por arquitecturas monolíticas, dependencias implícitas, documentación incompleta y tecnologías obsoletas. En organizaciones intensivas en datos, estos sistemas cumplen funciones de alto impacto, como procesamiento transaccional, gestión de información sensible, control operativo o soporte a la toma de decisiones.

La literatura señala que estos sistemas presentan tres características estructurales que dificultan su modernización:

Heterogeneidad tecnológica acumulada, resultado de décadas de evolución incremental.

Acoplamiento fuerte entre componentes, lo que dificulta la modularización y el reemplazo parcial.

Dependencia operativa crítica, que impide interrupciones prolongadas o cambios disruptivos.

Estas características convierten la modernización en un proceso de alto riesgo, donde la estabilidad operativa y la integridad de los datos son condiciones no negociables.

Deuda técnica como limitante estructural

La deuda técnica es un concepto ampliamente reconocido en la ingeniería de software para describir las consecuencias de decisiones de diseño que priorizan soluciones rápidas sobre soluciones óptimas. En sistemas críticos legados, la deuda técnica se manifiesta en:

- Código duplicado o inconsistente
- Arquitecturas rígidas
- Falta de trazabilidad entre artefactos
- Dependencias no documentadas
- Dificultad para incorporar nuevas funcionalidades

La acumulación de deuda técnica afecta directamente la capacidad de evolución del sistema, incrementa los costos de mantenimiento y aumenta el riesgo de fallos operativos. En entornos intensivos en datos, esta deuda se amplifica debido al volumen, variedad y velocidad de procesamiento requeridos.

La modernización, por tanto, no solo implica migrar tecnologías, sino gestionar y reducir la deuda técnica estructural que limita la sostenibilidad del sistema.

Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE): fundamentos y principios

La Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) propone elevar el nivel de abstracción mediante el uso de modelos formales como artefactos centrales del proceso de desarrollo. Según France y Rumpe (2007), MDE permite gestionar la complejidad de sistemas de gran escala mediante la separación de preocupaciones, la formalización del conocimiento y la automatización de transformaciones.

Los principios fundamentales de MDE incluyen:

- Modelos como primera clase: los modelos no son documentación, sino artefactos ejecutables o transformables.
- Metamodelos como definiciones formales: establecen la estructura, semántica y restricciones de los modelos.
- Transformaciones automáticas: permiten generar modelos derivados o código a partir de modelos fuente.
- Trazabilidad sistemática: garantiza la coherencia entre artefactos en diferentes niveles de abstracción.
- Estos principios permiten reducir errores, mejorar la consistencia y facilitar la evolución del software.

Modelos, metamodelos y transformaciones en procesos de modernización

La modernización de sistemas críticos mediante MDE se sustenta en tres elementos clave:

Modelos

Los modelos representan la estructura, comportamiento y relaciones del sistema legado.

Permiten:

- Comprender el sistema desde una perspectiva abstracta
- Identificar dependencias y puntos críticos
- Documentar conocimiento tácito acumulado

Metamodelos

Los metamodelos definen el lenguaje de modelado utilizado. En procesos de modernización, permiten:

- Establecer arquitecturas objetivo
- Definir reglas de consistencia
- Formalizar restricciones estructurales

Transformaciones automáticas

Las transformaciones modelo-modelo (M2M) y modelo-código (M2T) permiten:

- Migrar artefactos del sistema legado a modelos modernos
- Generar código o configuraciones a partir de modelos
- Automatizar tareas repetitivas y reducir errores humanos

France, Bieman y Cheng (2006) destacan el rol de repositorios como ReMoDD para almacenar, compartir y reutilizar artefactos de modelado, fortaleciendo la trazabilidad y la colaboración en procesos de modernización.

Trazabilidad y gobernanza técnica en MDE

La trazabilidad es un componente esencial en la modernización de sistemas críticos.

Permite:

- Relacionar artefactos en diferentes niveles de abstracción
- Controlar el impacto de cambios
- Garantizar la consistencia del sistema

ISO/IEC 25010 (2011) establece la trazabilidad como un atributo clave de la calidad del software, especialmente en sistemas críticos donde la integridad y confiabilidad son fundamentales.

En MDE, la trazabilidad se implementa mediante:

- Relaciones explícitas entre modelos
- Reglas de correspondencia entre metamodelos
- Transformaciones que preservan semántica
- Esto permite una gobernanza técnica más robusta y una modernización más controlada.

MDE como estrategia para la modernización progresiva

La modernización progresiva implica transformar el sistema de manera incremental, evitando interrupciones operativas. MDE facilita este enfoque mediante:

- Migración gradual de componentes
- Coexistencia de modelos legados y modernos
- Automatización de transformaciones
- Validación continua mediante modelos

Brambilla, Cabot y Wimmer (2017) destacan que MDE permite integrar prácticas de ingeniería inversa, ingeniería directa y evolución continua, lo que la convierte en una estrategia adecuada para sistemas críticos.

Síntesis del marco teórico

El análisis teórico demuestra que:

- 1) Los sistemas críticos legados presentan complejidad estructural y deuda técnica que dificultan su modernización.
- 2) MDE ofrece mecanismos formales para gestionar esta complejidad mediante modelos, metamodelos y transformaciones.
- 3) La trazabilidad y la automatización son elementos clave para garantizar estabilidad operativa durante la modernización.
- 4) La literatura respalda el uso de MDE como estrategia viable para modernizar sistemas críticos en organizaciones intensivas en datos.

Tabla 1

Comparación entre sistemas críticos legados y sistemas modernizados mediante MDE

Dimensión evaluada	Sistemas críticos legados	Sistemas modernizados con MDE
Arquitectura	Monolítica, rígida, acoplada	Modular, desacoplada, orientada a modelos.
Documentación	Escasa, desactualizada	Formalizada mediante modelos y metamodelos.
Trazabilidad	Limitada o inexistente	Completa, automática y bidireccional.
Evolución	Costosa, riesgosa	Progresiva, controlada y automatizada.
Deuda técnica	Alta, acumulada por décadas	Reducida mediante transformaciones sistemáticas
Integración	Difícil, dependencias implícitas	Facilitada por modelos y reglas formales.
Riesgo operativo	Elevado	Mitigado mediante validación incremental.

Tabla 2*Comparación entre enfoques tradicionales de modernización y enfoque MDE*

Criterio	Reescritura total	Migración manual	Modernización basada en MDE
Costo	Muy alto	Alto	Moderado
Riesgo	Extremo (pérdida de funcionalidad)	Alto	Bajo
Tiempo	Largo	Largo	Medio
Automatización	Nula	Baja	Alta
Preservación de semántica	No garantizada	Parcial	Garantizada por modelos
Escalabilidad	Limitada	Limitada	Alta
Trazabilidad	No	Parcial	Completa

METODOLOGÍA

La modernización de sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos requiere un enfoque metodológico capaz de gestionar simultáneamente la complejidad técnica, la estabilidad operativa y la necesidad de evolución continua. La metodología propuesta se fundamenta en los principios de la Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) y se estructura en cuatro fases interdependientes: (1) descubrimiento y modelado del sistema legado, (2) definición del metamodelo objetivo, (3) diseño y ejecución de transformaciones automáticas, y (4) validación y despliegue incremental. Cada fase integra actividades, artefactos y mecanismos de trazabilidad que permiten avanzar de manera controlada hacia la modernización progresiva del sistema.

Descubrimiento y modelado del sistema legado

Esta fase tiene como propósito comprender la estructura, comportamiento y dependencias del sistema crítico existente. Dado que los sistemas legados suelen carecer de documentación actualizada, la metodología se apoya en técnicas de ingeniería inversa y análisis estático y dinámico.

Actividades principales

Extracción de artefactos existentes: código fuente, configuraciones, scripts, esquemas de bases de datos, logs operativos.

- **Análisis estructural:** identificación de módulos, componentes, dependencias internas y externas.
- **Modelado del comportamiento:** flujos de procesos, interacciones, reglas de negocio y eventos críticos.
- **Identificación de deuda técnica:** duplicación de código, acoplamiento excesivo, puntos de falla, obsolescencia tecnológica.

Artefactos generados

- Modelos estructurales (clases, componentes, paquetes).
- Modelos de comportamiento (diagramas de actividades, secuencias, estados).
- Mapa de dependencias internas y externas.
- Informe de deuda técnica priorizada.

Justificación metodológica

Esta fase permite construir una representación formal del sistema legado, necesaria para aplicar transformaciones posteriores y garantizar que la modernización preserve la semántica funcional.

Definición del metamodelo objetivo

El metamodelo objetivo constituye la especificación formal del sistema modernizado. Define los conceptos, relaciones, restricciones y reglas de consistencia que guiarán la transformación del sistema legado hacia una arquitectura moderna.

Actividades principales

- Selección del estilo arquitectónico objetivo: microservicios, arquitectura hexagonal, capas limpias, etc.
- Definición del metamodelo: entidades, atributos, relaciones, restricciones OCL, reglas de composición.
- Especificación de requisitos de calidad: trazabilidad, modularidad, mantenibilidad, interoperabilidad.
- Establecimiento de reglas de correspondencia entre el modelo legado y el modelo objetivo.

Artefactos generados

- Metamodelo formal del sistema objetivo.
- Reglas de consistencia estructural y semántica.
- Catálogo de restricciones y validaciones.
- Mapa de correspondencia entre modelos fuente y destino.

Justificación metodológica

El metamodelo objetivo actúa como contrato formal que garantiza que la modernización no dependa de interpretaciones subjetivas, sino de reglas explícitas y verificables.

Transformaciones automáticas

Esta fase constituye el núcleo operativo de la metodología. Se diseñan y ejecutan transformaciones modelo-modelo (M2M) y modelo-código (M2T) que permiten migrar artefactos del sistema legado hacia el sistema objetivo de manera sistemática y reproducible.

Actividades principales

- Diseño de transformaciones M2M: reglas que convierten modelos legados en modelos conformes al metamodelo objetivo.
- Diseño de transformaciones M2T: generación de código, configuraciones, artefactos de despliegue o documentación técnica.
- Implementación en herramientas MDE: ATL, QVT, Acceleo, EMF, Sirius.
- Ejecución incremental de transformaciones: migración por módulos, dominios funcionales o capas arquitectónicas.
- Gestión de trazabilidad: enlaces entre modelos fuente, modelos destino y artefactos generados.

Artefactos generados

- Transformaciones M2M y M2T implementadas.
- Modelos modernizados.
- Código y configuraciones generadas automáticamente.
- Matrices de trazabilidad entre artefactos.

Justificación metodológica.

La automatización reduce errores humanos, acelera el proceso de modernización y garantiza consistencia entre artefactos, especialmente en sistemas de gran escala.

Validación y despliegue incremental

La modernización de sistemas críticos no puede realizarse mediante reemplazos abruptos. Esta fase garantiza que cada componente modernizado sea validado antes de su integración operativa.

Actividades principales

- **Validación estructural:** conformidad con el metamodelo objetivo.
- **Validación funcional:** pruebas unitarias, de integración y de regresión.
- **Validación operativa:** pruebas de rendimiento, seguridad y estabilidad.
- **Despliegue incremental:** coexistencia temporal entre componentes legados y modernizados.
- **Monitoreo y retroalimentación:** métricas de calidad, trazabilidad y deuda técnica residual.

Artefactos generados

- Informes de validación estructural y funcional.
- Artefactos desplegados en entornos controlados.
- Métricas de calidad y evolución.
- Plan de migración progresiva.

Justificación metodológica

El despliegue incremental reduce riesgos, permite retroalimentación continua y asegura que la modernización no afecte la estabilidad operativa del sistema crítico.

Integración transversal de trazabilidad

La trazabilidad se implementa como un mecanismo transversal a todas las fases. Permite relacionar artefactos en diferentes niveles de abstracción y controlar el impacto de los cambios.

Mecanismos de trazabilidad

- Enlaces entre modelos legados y modelos objetivo.
- Relaciones entre transformaciones y artefactos generados.
- Registros de decisiones arquitectónicas.
- Matrices de impacto para cambios futuros.

Justificación metodológica

La trazabilidad garantiza coherencia, auditabilidad y gobernanza técnica, atributos esenciales en sistemas críticos.

Síntesis metodológica

La metodología propuesta integra análisis, modelado, automatización y validación continua para permitir una modernización progresiva, controlada y trazable. Su estructura modular facilita la adaptación a diferentes contextos organizacionales y arquitecturas objetivo, manteniendo siempre la estabilidad operativa como principio rector.

Tabla 3

Fases de la metodología propuesta y sus principales artefactos

Fase metodológica	Actividades clave	Artefactos generados
Descubrimiento y modelado	Ingeniería inversa, análisis estructural y dinámico	Modelos del sistema legado, mapa de dependencias, informe de deuda
Definición del metamodelo	Diseño arquitectónico, reglas de consistencia	Metamodelo objetivo, restricciones OCL, mapa de correspondencias
Transformaciones automáticas	Diseño M2M y M2T, ejecución incremental	Modelos transformados, código generado, matrices de trazabilidad
Validación y despliegue	Pruebas, integración continua, monitoreo	Informes de validación, artefactos desplegados, métricas de calidad

RESULTADOS

La aplicación del marco metodológico basado en Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) para la modernización de sistemas críticos legados permite anticipar un conjunto de resultados que impactan tanto la estructura interna del sistema como los procesos organizacionales asociados a su evolución. Estos resultados esperados se agrupan en cinco dimensiones: (1) reducción de deuda técnica, (2) fortalecimiento de la trazabilidad y la gobernanza técnica, (3) mejora de la

calidad estructural y arquitectónica, (4) incremento de la automatización y la eficiencia operativa, y (5) consolidación de capacidades organizacionales para la evolución continua del sistema.

Reducción significativa de la deuda técnica estructural.

La modernización progresiva mediante modelos permite identificar, clasificar y mitigar la deuda técnica acumulada durante años de evolución incremental. Se espera:

- Eliminación de duplicidades y dependencias implícitas.
- Reducción del acoplamiento entre componentes.
- Sustitución de artefactos obsoletos por estructuras formales basadas en modelos.
- Disminución del riesgo asociado a fallos derivados de código heredado.

Este resultado contribuye directamente a mejorar la mantenibilidad y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

Fortalecimiento de la trazabilidad y la gobernanza técnica.

La integración de trazabilidad transversal en todas las fases del proceso permite:

- Relacionar artefactos en diferentes niveles de abstracción.
- Controlar el impacto de cambios en componentes críticos.
- Garantizar la coherencia entre modelos, transformaciones y código generado.
- Facilitar auditorías técnicas y cumplimiento normativo.

En sistemas críticos, donde la integridad y confiabilidad son esenciales, este resultado constituye un avance significativo en la gobernanza del software.

Mejora de la calidad estructural y arquitectónica del sistema.

La definición de un metamodelo objetivo y la aplicación de transformaciones sistemáticas permiten:

- Migrar gradualmente hacia arquitecturas modernas (por ejemplo, microservicios o arquitecturas hexagonales).
- Incrementar la modularidad y la separación de responsabilidades.
- Formalizar reglas de consistencia y restricciones estructurales.
- Reducir la complejidad inherente del sistema legado.

El resultado es un sistema más robusto, flexible y alineado con estándares contemporáneos de ingeniería de software.

Incremento de la automatización y eficiencia operativa

La automatización de transformaciones modelo-modelo (M2M) y modelo-código (M2T) genera beneficios operativos tangibles:

- Reducción del tiempo necesario para migrar componentes.
- Disminución de errores humanos en tareas repetitivas.
- Generación automática de artefactos de despliegue, documentación y configuraciones.
- Aceleración del ciclo de modernización mediante iteraciones más cortas y controladas.

Este resultado contribuye a una modernización más eficiente y menos costosa.

Consolidación de capacidades organizacionales para la evolución continua

La adopción de MDE no solo transforma el sistema, sino también las prácticas organizacionales. Se espera:

- Desarrollo de competencias avanzadas en modelado y automatización.
- Integración de prácticas de ingeniería inversa, ingeniería directa y evolución continua.
- Mayor alineación entre equipos técnicos y de negocio mediante modelos comprensibles y verificables.
- Establecimiento de una cultura de documentación formal y trazabilidad.

Este resultado fortalece la capacidad institucional para mantener y evolucionar sistemas críticos de manera sostenible.

Disminución del riesgo operativo durante la modernización

El enfoque incremental y basado en modelos permite:

- Validar cada componente antes de su despliegue.
- Garantizar la coexistencia temporal entre artefactos legados y modernizados.
- Minimizar interrupciones en servicios esenciales.
- Reducir la probabilidad de fallos catastróficos durante la transición.

Este resultado es especialmente relevante en organizaciones donde la continuidad operativa es un requisito fundamental.

Incremento de la capacidad de evolución del sistema

La modernización basada en MDE facilita:

- Incorporación más rápida de nuevas funcionalidades.
- Adaptación a cambios regulatorios o tecnológicos.
- Integración con plataformas modernas de datos, automatización y servicios.
- Evolución continua sin necesidad de reescrituras completas.

El sistema resultante es más adaptable, escalable y preparado para futuros ciclos de transformación digital.

Síntesis de los resultados esperados

En conjunto, los resultados esperados evidencian que la metodología basada en MDE no solo moderniza el sistema crítico legado, sino que transforma la forma en que la organización gestiona su infraestructura tecnológica. La combinación de reducción de deuda técnica, trazabilidad robusta, automatización, calidad arquitectónica y capacidades organizacionales crea un entorno propicio para la evolución continua y sostenible del sistema.

Tabla 4

Comparación de herramientas MDE utilizadas en procesos de modernización

Herramienta MDE	Tipo de herramienta	Capacidades principales	Limitaciones relevantes
ATL	Transformaciones modelo–modelo (M2M)	Reglas declarativas, alto nivel de abstracción	Curva de aprendizaje moderada
QVT	Transformaciones M2M estándar OMG	Lenguaje formal, soporte para relaciones bidireccionales	Implementaciones incompletas en algunos entornos
Acceleo	Transformaciones modelo–código (M2T)	Generación automática de código y artefactos	Dependencia fuerte del metamodelo
EMF (Eclipse)	Framework de modelado	Creación de metamodelos, validación, edición de modelos	Requiere configuración avanzada para proyectos complejos
Sirius	Diseño de vistas y editores gráficos	Modelado visual, dashboards, diagramas personalizados	No orientado a transformaciones automáticas

Tabla 5

Comparación de arquitecturas objetivo para modernización

Arquitectura objetivo	Características principales	Ventajas para modernización	Limitaciones o riesgos
Microservicios	Servicios independientes, comunicación ligera	Escalabilidad, despliegue independiente, modularidad	Complejidad operativa, necesidad de orquestación
Arquitectura hexagonal	Separación de dominio, puertos y adaptadores	Aislamiento del núcleo, pruebas más simples	Requiere rediseño conceptual profundo
Arquitectura limpia	Capas concéntricas, independencia de frameworks	Alta mantenibilidad, claridad estructural	Migración gradual puede ser compleja
SOA	Servicios reutilizables, contratos formales	Integración empresarial, estandarización	Sobrecarga de gobernanza, menor granularidad que microservicios

Tabla 6

Comparación de métricas de deuda técnica antes y después de aplicar MDE

MÉTRICA EVALUADA	SITUACIÓN ANTES DE MDE	SITUACIÓN DESPUÉS DE MDE
COMPLEJIDAD CICLOMÁTICA	Alta, difícil de gestionar	Reducida mediante refactorización guiada por modelos
DUPLICACIÓN DE CÓDIGO	Frecuente, no documentada	Eliminada o minimizada mediante transformaciones M2M
ACOPLAMIENTO ENTRE MÓDULOS	Elevado, dependencias implícitas	Disminuido por modularización basada en metamodelos
COBERTURA DE PRUEBAS	Baja o inexistente	Incrementada mediante validación incremental
TRAZABILIDAD	Limitada o nula	Completa y automática
TIEMPO DE MANTENIMIENTO	Alto y variable	Reducido y más predecible
RIESGO DE FALLOS OPERATIVOS	Elevado	Mitigado mediante despliegue incremental

DISCUSIÓN

La modernización de sistemas críticos legados mediante Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) plantea implicaciones técnicas, organizacionales y metodológicas que deben analizarse desde una perspectiva crítica. La discusión se centra en cuatro ejes: (1) la pertinencia de MDE como enfoque para sistemas críticos, (2) los desafíos prácticos de su implementación, (3) las tensiones entre automatización y control humano, y (4) la sostenibilidad del proceso de modernización en organizaciones intensivas en datos.

Pertinencia de MDE para sistemas críticos legados

Los resultados esperados muestran que MDE ofrece ventajas significativas en términos de trazabilidad, reducción de deuda técnica y automatización. Sin embargo, su pertinencia no se limita a beneficios técnicos; también responde a la necesidad de formalizar el conocimiento tácito acumulado en sistemas que han evolucionado durante décadas. La capacidad de MDE para representar estructuras complejas mediante modelos formales permite comprender dependencias que, de otro modo, permanecerían ocultas. Esto es especialmente relevante en sistemas críticos donde la falta de documentación constituye un riesgo operativo.

Desafíos prácticos en la adopción de MDE

A pesar de sus ventajas, la implementación de MDE enfrenta barreras importantes:

- **Curva de aprendizaje elevada:** el dominio de metamodelos, transformaciones y herramientas requiere competencias avanzadas.
- **Resistencia organizacional:** equipos acostumbrados a prácticas tradicionales pueden percibir MDE como disruptivo.
- **Limitaciones de herramientas:** aunque existen frameworks maduros, su integración con sistemas legados no siempre es directa.
- **Costos iniciales:** la fase de descubrimiento y modelado puede demandar recursos significativos.

Estos desafíos no invalidan el enfoque, pero sí requieren estrategias de gestión del cambio, capacitación y adopción gradual.

Tensiones entre automatización y control humano

La automatización mediante transformaciones M2M y M2T reduce errores y acelera la modernización, pero introduce tensiones importantes:

- La automatización excesiva puede generar dependencia de herramientas específicas.
- La validación humana sigue siendo indispensable para garantizar que la semántica funcional se preserve.
- La trazabilidad automatizada debe complementarse con decisiones arquitectónicas explícitas.

En sistemas críticos, la automatización debe equilibrarse con mecanismos de supervisión humana que garanticen confiabilidad y control.

Sostenibilidad del proceso de modernización

La modernización no debe entenderse como un evento puntual, sino como un proceso continuo. MDE contribuye a esta sostenibilidad mediante:

- Modelos que pueden evolucionar junto con el sistema.
- Transformaciones reutilizables para futuros ciclos de modernización.
- Trazabilidad que facilita auditorías y mantenimiento.
- Arquitecturas objetivo que permiten escalabilidad y adaptación.

Sin embargo, la sostenibilidad depende también de factores organizacionales, como la capacidad de retener talento especializado y la institucionalización de prácticas basadas en modelos.

Síntesis crítica

La discusión evidencia que MDE no es una solución universal, pero sí un enfoque sólido para modernizar sistemas críticos en organizaciones intensivas en datos. Su efectividad depende de la calidad del modelado, la madurez organizacional y la capacidad de integrar automatización con gobernanza técnica. La metodología propuesta ofrece un camino viable, pero su éxito requiere una implementación disciplinada y una visión estratégica de largo plazo.

Tabla 7

Comparación entre desafíos técnicos y organizacionales en la adopción de MDE

Tipo de desafío	Descripción	Impacto en la modernización
Técnico	Complejidad del modelado y metamodelado	Retrasos iniciales, necesidad de expertos
Técnico	Integración con sistemas legados	Requiere ingeniería inversa avanzada
Organizacional	Resistencia al cambio	Afecta adopción y continuidad del proceso
Organizacional	Falta de competencias en MDE	Necesidad de capacitación y acompañamiento
Estratégico	Falta de visión de largo plazo	Riesgo de modernización incompleta
Estratégico	Dependencia de proveedores o herramientas	Afecta sostenibilidad y autonomía técnica

Tabla 8*Tensiones entre automatización y supervisión humana en MDE*

Dimensión evaluada	Automatización mediante MDE	Supervisión humana
Velocidad	Alta, reduce tiempos de migración	Media, depende de expertos
Precisión	Consistente, basada en reglas formales	Alta en decisiones complejas
Riesgo	Bajo en tareas repetitivas	Bajo en validación semántica
Flexibilidad	Limitada a reglas definidas	Alta, permite interpretación contextual
Confiabilidad	Alta si las reglas están bien definidas	Alta si hay expertos con conocimiento del dominio

Tabla 9*Factores que influyen en la sostenibilidad de la modernización basada en MDE*

Factor	Influencia en la sostenibilidad	Relevancia para sistemas críticos
Calidad del metamodelo	Determina la capacidad de evolución del sistema	Alta
Competencias del equipo	Asegura continuidad y mantenimiento	Alta
Gobernanza técnica	Controla trazabilidad, auditoría y decisiones arquitectónicas	Muy alta
Herramientas MDE	Facilitan automatización y consistencia	Media
Cultura organizacional	Afecta adopción y permanencia del enfoque	Alta

CONCLUSIONES

La modernización de sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos constituye un desafío técnico y organizacional de alta complejidad, cuya resolución exige enfoques capaces de gestionar simultáneamente la estabilidad operativa, la reducción de deuda técnica y la capacidad de evolución continua. A partir del análisis teórico, la metodología propuesta y la discusión crítica, se concluye que la Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) ofrece

un marco conceptual y operativo robusto para abordar este tipo de procesos de manera progresiva, controlada y trazable.

El estudio demuestra que MDE permite elevar el nivel de abstracción mediante modelos formales que capturan la estructura y comportamiento del sistema legado, facilitando la comprensión de dependencias, la identificación de puntos críticos y la formalización del conocimiento tácito acumulado. La definición de un metamodelo objetivo actúa como contrato arquitectónico que orienta la modernización hacia estructuras más modulares, mantenibles y alineadas con estándares contemporáneos. Asimismo, las transformaciones automáticas M2M y M2T reducen errores humanos, aceleran la migración y garantizan consistencia entre artefactos, mientras que la trazabilidad transversal fortalece la gobernanza técnica y la auditabilidad del proceso.

Los resultados esperados y la discusión evidencian que la modernización basada en MDE no solo transforma el sistema, sino también las prácticas organizacionales, promoviendo una cultura de documentación formal, automatización y evolución continua. Sin embargo, su adopción requiere competencias avanzadas, estrategias de gestión del cambio y una visión institucional de largo plazo. La sostenibilidad del proceso depende de la calidad del metamodelo, la madurez del equipo técnico y la capacidad de integrar automatización con supervisión humana experta.

En síntesis, MDE se presenta como una estrategia viable y científicamente fundamentada para modernizar sistemas críticos legados en organizaciones intensivas en datos, permitiendo avanzar hacia arquitecturas más flexibles, trazables y sostenibles sin comprometer la estabilidad operativa. El marco metodológico propuesto constituye una contribución relevante para la ingeniería de software aplicada a contextos de alta criticidad, y abre líneas futuras de investigación orientadas a la validación empírica, la integración con técnicas de ingeniería inversa avanzada y la automatización inteligente mediante modelos enriquecidos con capacidades semánticas.

Recomendaciones

La modernización de sistemas críticos legados mediante MDE requiere no solo una metodología sólida, sino también condiciones organizacionales, técnicas y estratégicas que garanticen su implementación efectiva. A partir del análisis realizado, se proponen las siguientes recomendaciones:

Institucionalizar prácticas de modelado como parte del ciclo de vida del software.

Las organizaciones deben adoptar el modelado como actividad central y no como tarea secundaria. Esto implica:

- Incorporar modelos y metamodelos en procesos de diseño, mantenimiento y evolución.
- Establecer estándares internos de modelado y trazabilidad.
- Integrar repositorios colaborativos para gestionar artefactos de MDE.

Desarrollar capacidades técnicas especializadas en MDE.

La adopción de MDE exige competencias avanzadas. Se recomienda:

- Programas de formación continua en metamodelado, transformaciones M2M y M2T.
- Equipos multidisciplinarios que combinen experiencia en sistemas legados y modelado formal.
- Estrategias de mentoría interna para acelerar la curva de aprendizaje.

Implementar la modernización de manera incremental y controlada.

Para minimizar riesgos operativos:

- Priorizar componentes críticos mediante análisis de impacto.
- Ejecutar transformaciones y despliegues en ciclos iterativos.
- Validar cada incremento mediante pruebas estructurales, funcionales y operativas.

Fortalecer la gobernanza técnica y la trazabilidad.

La trazabilidad debe ser transversal al proceso de modernización. Se recomienda:

- Definir políticas de trazabilidad obligatoria entre modelos, transformaciones y código.
- Utilizar herramientas que automaticen la generación y mantenimiento de enlaces.
- Documentar decisiones arquitectónicas para asegurar auditabilidad.

Seleccionar herramientas MDE alineadas con el contexto organizacional.

No todas las herramientas son adecuadas para todos los sistemas. Se recomienda:

- Evaluar herramientas según su compatibilidad con tecnologías legadas.
- Priorizar frameworks con soporte activo y comunidades maduras.
- Evitar dependencias excesivas de proveedores o plataformas propietarias.

Integrar la modernización con estrategias de transformación digital.

La modernización no debe verse como un proyecto aislado. Se recomienda:

- Alinear la modernización con objetivos institucionales de datos, automatización y servicios.
- Incorporar prácticas de DevOps, integración continua y despliegue continuo.
- Aprovechar la modernización para mejorar procesos de negocio y no solo tecnología.

Promover una cultura organizacional orientada a la evolución continua.

La sostenibilidad del proceso depende de la cultura interna. Se recomienda:

- Fomentar la documentación formal y la toma de decisiones basada en modelos.
- Incentivar la colaboración entre áreas técnicas y funcionales.
- Establecer mecanismos de retroalimentación continua para mejorar la metodología.

Realizar evaluaciones periódicas de deuda técnica y calidad.

Para mantener la evolución del sistema:

- Aplicar métricas de calidad (ISO/IEC 25010) de manera recurrente.
- Actualizar modelos y metamodelos conforme evoluciona el sistema.
- Revisar transformaciones M2M y M2T para asegurar su vigencia.

REFERENCIAS

- Brambilla, M., Cabot, J., & Wimmer, M. (2017). *Model-driven software engineering in practice* (2nd ed.). Morgan & Claypool.
<https://doi.org/10.2200/S00751ED2V01Y201701SWE004>
- Canfora, G., & Di Penta, M. (2007). New frontiers of reverse engineering. In *2007 Future of Software Engineering (FOSE '07)* (pp. 326–341). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/FOSE.2007.15>
- Evans, E. (2004). *Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software*. Addison-Wesley.
- Fowler, M. (2019). *Refactoring: Improving the design of existing code* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- France, R., Bieman, J., & Cheng, B. H. C. (2006). *Repository for Model Driven Development (ReMoDD)*. Paper presented at the 9th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS 2006), Genova, Italy.
- France, R., & Rumpe, B. (2007). Model-driven development of complex software: A research roadmap. In *2007 Future of Software Engineering (FOSE '07)* (pp. 37–54). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/FOSE.2007.14>
- ISO/IEC. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) System and software quality models*. International Organization for Standardization.
- Kleppe, A., Warmer, J., & Bast, W. (2003). *MDA explained: The model driven architecture—Practice and promise*. Addison-Wesley.
- Khatchadourian, R., & Masuhara, H. (2017). Automated refactoring of legacy Java software to default methods. In *2013 IEEE International Conference on Software Maintenance* (pp. 23–32). IEEE. DOI:[10.1109/ICSE.2017.16](https://doi.org/10.1109/ICSE.2017.16)
- Mens, T., & Demeyer, S. (Eds.). (2008). *Software evolution*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-76440-3>
- Newman, S. (2015). *Building microservices*. O'Reilly Media.
- Object Management Group. (2016). *Meta Object Facility (MOF) Core Specification, Version 2.5.1*. <https://www.omg.org/spec/MOF/2.5.1>
- Object Management Group. (2016). *Query/View/Transformation (QVT), Version 1.3*. <https://www.omg.org/spec/QVT/1.3>
- Object Management Group. (2016). *Unified Modeling Language (UML), Version 2.5.1*. <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1>
- Richardson, C. (2018). *Microservices patterns: With examples in Java*. Manning Publications.
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.