

**LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y
Humanidades, Asunción, Paraguay**

ISSN en línea: 2789-3855, 2026

Modernización de sistemas críticos mediante ingeniería dirigida por modelos

Model-driven engineering for the modernization of critical systems

Maria Teodolinda Ortega Ovalle

maria.ortegao@up.ac.pa

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

Universidad de Panamá

Panamá

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5537>

Artículo recibido: 11 de noviembre de 2025.
Aceptado para publicación: 18 de marzo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

**Redilat**
Red de Investigadores
Latinoamericanos

**LATAM**
Revista Latinoamericana de
Ciencias Sociales y Humanidades

VOLUMEN VII

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5537>

Modernización de sistemas críticos mediante ingeniería dirigida por modelos

Model-driven engineering for the modernization of critical systems

Maria Teodolinda Ortega Ovalle

maria.ortegao@up.ac.pa

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

Universidad de Panamá
Panamá

Artículo recibido: 11 de noviembre de 2025. Aceptado para publicación: 18 de marzo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

La modernización de sistemas críticos representa un desafío persistente para organizaciones que dependen de infraestructuras heredadas con altos niveles de acoplamiento, baja trazabilidad y una acumulación significativa de deuda técnica. La Ingeniería de Software Dirigida por Modelos (MDE) ha emergido como un enfoque estratégico para abordar estos problemas mediante la automatización de transformaciones, la generación sistemática de artefactos y el establecimiento de relaciones explícitas entre modelos, código y requisitos. Este estudio analiza el impacto de MDE en procesos de modernización, evaluando su contribución a la reducción de deuda técnica estructural, la mejora de la trazabilidad y la aceleración de ciclos de evolución en sistemas críticos. A través de una revisión sistemática focalizada, un análisis comparativo de enfoques tradicionales y dirigidos por modelos, y el estudio de casos documentados en sectores como salud, energía y finanzas, se identifican beneficios, limitaciones y condiciones necesarias para una adopción efectiva. Los resultados muestran que MDE permite aumentar la consistencia arquitectónica, automatizar tareas repetitivas y mejorar la calidad de los artefactos generados, aunque su efectividad depende de la calidad de los metamodelos, la disciplina metodológica y la integración con prácticas DevOps. El estudio concluye que MDE constituye un habilitador clave para la modernización sostenible de sistemas críticos cuando se implementa bajo una gobernanza técnica sólida.


Palabras clave: ingeniería dirigida por modelos, modernización de sistemas críticos, deuda técnica, trazabilidad, automatización, metamodelos, evolución arquitectónica

Abstract

Modernizing critical systems remains a persistent challenge for organizations that rely on legacy infrastructures characterized by tight coupling, limited traceability, and significant accumulated technical debt. Model-Driven Engineering (MDE) has emerged as a strategic approach to address these issues by enabling automated transformations, systematic artifact generation, and explicit relationships between models, code, and requirements. This study examines the role of MDE in modernization processes, assessing its contribution to reducing structural technical debt, improving traceability, and accelerating system evolution in critical domains. Through a focused systematic review, a comparative analysis of traditional and model-driven approaches, and case studies from sectors such as healthcare, energy, and finance, the research identifies key benefits, limitations, and conditions required for effective adoption. Findings indicate that MDE enhances architectural consistency, automates repetitive engineering tasks, and improves the quality of generated artifacts,

although its effectiveness depends on metamodel quality, methodological discipline, and integration with DevOps practices. The study concludes that MDE is a key enabler for sustainable modernization of critical systems when implemented under strong technical governance and supported by mature engineering practices.

Keywords: model-driven engineering, critical systems modernization, technical debt, traceability, automation, metamodels, architectural evolution

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Ortega Ovalle, M. T. (2026). Modernización de sistemas críticos mediante ingeniería dirigida por modelos. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (2), 184 – 192. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5537>

INTRODUCCIÓN

La modernización de sistemas críticos constituye uno de los desafíos más relevantes en la ingeniería de software contemporánea, especialmente en organizaciones que dependen de infraestructuras heredadas con altos niveles de acoplamiento, baja trazabilidad y una acumulación significativa de deuda técnica. Estos sistemas, presentes en sectores como salud, energía, finanzas y transporte, deben mantener niveles estrictos de confiabilidad, disponibilidad y auditabilidad, lo que dificulta la incorporación de nuevas tecnologías y la adaptación a requisitos regulatorios cambiantes. La literatura señala que la evolución de sistemas críticos suele verse limitada por arquitecturas rígidas, procesos manuales y la ausencia de mecanismos formales de trazabilidad entre requisitos, modelos y código, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la capacidad de respuesta organizacional (ISO/IEC, 2011).

En este contexto, la Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) ha emergido como un enfoque estratégico para abordar la complejidad inherente a la modernización. MDE propone elevar el nivel de abstracción mediante metamodelos, transformaciones automáticas y generación sistemática de artefactos, permitiendo reducir la dependencia del código manual y mejorar la consistencia arquitectónica. Estudios recientes destacan que los enfoques dirigidos por modelos pueden disminuir la deuda técnica estructural, facilitar la evolución controlada y mejorar la calidad de los artefactos generados, siempre que existan metamodelos robustos y prácticas disciplinadas de ingeniería (Taibi et al., 2018).

A pesar de estos avances, persisten brechas significativas en la comprensión de cómo MDE contribuye específicamente a la modernización de sistemas críticos, donde los requisitos de trazabilidad, auditabilidad y estabilidad operativa son más estrictos que en otros dominios. Este estudio aborda dicha brecha mediante un análisis sistemático de enfoques dirigidos por modelos aplicados a la modernización, evaluando su impacto en la automatización, la trazabilidad y la reducción de deuda técnica. El objetivo es identificar beneficios, limitaciones y condiciones necesarias para una adopción efectiva de MDE en entornos críticos, aportando evidencia que permita orientar decisiones arquitectónicas y estratégicas en procesos de modernización.

METODOLOGÍA

El estudio adopta un enfoque metodológico mixto que combina revisión sistemática focalizada, análisis comparativo y estudio de casos documentados para examinar el papel de la Ingeniería Dirigida por Modelos en la modernización de sistemas críticos. Esta aproximación permite integrar evidencia teórica, empírica y práctica, garantizando una comprensión amplia y rigurosa del fenómeno estudiado. La metodología se estructura en cuatro fases complementarias, cada una orientada a responder aspectos específicos del problema de investigación.

Revisión sistemática focalizada

La primera fase consiste en una revisión sistemática focalizada de literatura académica publicada entre 2010 y 2024 en bases como IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus y SpringerLink. Se seleccionan estudios que abordan Ingeniería Dirigida por Modelos, modernización de sistemas críticos, deuda técnica estructural, trazabilidad y automatización de procesos de ingeniería. Los criterios de inclusión consideran relevancia temática, rigor metodológico y aplicabilidad a dominios críticos. Esta revisión permite identificar patrones, beneficios, limitaciones y brechas de conocimiento reportadas en investigaciones previas, así como establecer el marco conceptual que sustenta el análisis posterior (Taibi et al., 2018).

Análisis comparativo de enfoques de modernización

La segunda fase desarrolla un análisis comparativo entre enfoques tradicionales de modernización y estrategias basadas en Ingeniería Dirigida por Modelos. Este análisis se fundamenta en los atributos de calidad definidos por ISO/IEC 25010, especialmente modularidad, analizabilidad, modificabilidad, trazabilidad y capacidad de prueba. Para cada atributo se examinan evidencias empíricas reportadas en la literatura, identificando cómo MDE contribuye a mejorar la calidad estructural del software y a reducir la deuda técnica en comparación con enfoques manuales o centrados exclusivamente en el código. Esta fase permite establecer relaciones entre decisiones metodológicas y su impacto en la sostenibilidad de sistemas críticos.

Estudio de casos documentados

La tercera fase incorpora el análisis de casos documentados provenientes de sectores críticos como salud, energía, finanzas y transporte. Se seleccionan casos que describen procesos de modernización mediante MDE, incluyendo migración desde sistemas heredados, refactorización automatizada, generación de artefactos y establecimiento de trazabilidad entre modelos y código. Para cada caso se examinan motivaciones, desafíos, estrategias de mitigación, resultados obtenidos y efectos en la deuda técnica y la evolución del sistema. Esta fase permite contextualizar los hallazgos teóricos en escenarios reales de operación crítica, donde los requisitos de confiabilidad y auditabilidad son especialmente estrictos.

Síntesis y triangulación

Finalmente, los resultados de las tres fases se integran mediante un proceso de triangulación que permite identificar convergencias, divergencias y vacíos de conocimiento. Esta síntesis facilita la formulación de conclusiones equilibradas sobre el impacto de MDE en la modernización de sistemas críticos, así como la identificación de condiciones necesarias para una adopción efectiva, incluyendo gobernanza técnica, calidad de metamodelos, disciplina metodológica e integración con prácticas DevOps (Bass et al., 2015). La triangulación asegura que los resultados no dependan de una única fuente de evidencia, sino de la convergencia entre teoría, comparación estructurada y casos reales.

DESARROLLO

La modernización de sistemas críticos se ha convertido en un eje central de la ingeniería de software contemporánea debido a la creciente presión por adaptar infraestructuras heredadas a entornos tecnológicos dinámicos, regulaciones cambiantes y demandas operativas cada vez más estrictas. Estos sistemas, caracterizados por altos niveles de disponibilidad, confiabilidad y trazabilidad, suelen presentar arquitecturas monolíticas rígidas, baja modularidad y una acumulación significativa de deuda técnica, lo que dificulta su evolución y mantenimiento. El modelo de calidad ISO/IEC 25010 establece que atributos como modularidad, analizabilidad, modificabilidad y capacidad de prueba son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de sistemas complejos, especialmente en dominios críticos donde los errores pueden tener consecuencias severas (ISO/IEC, 2011).

Además, la literatura especializada destaca que la Ingeniería Dirigida por Modelos ha evolucionado hacia un ecosistema maduro de técnicas, herramientas y prácticas que permiten gestionar la complejidad del software mediante abstracciones formales. Brambilla, Cabot y Wimmer (2017) señalan que el uso disciplinado de modelos facilita la estandarización de artefactos y la automatización de tareas repetitivas, mientras que Sendall y Kozaczynski (2003) enfatizan que las transformaciones de modelos constituyen el núcleo operativo de MDE al permitir la generación sistemática de código y la sincronización entre niveles de abstracción. Asimismo, France, Bieman y

Cheng (2006) destacan la importancia de repositorios especializados para almacenar modelos y promover la reutilización estructurada en procesos de ingeniería.

En este contexto, la Ingeniería Dirigida por Modelos (Model-Driven Engineering, MDE) ha emergido como un enfoque que busca elevar el nivel de abstracción mediante el uso de modelos, metamodelos y transformaciones automáticas para guiar el desarrollo y la evolución del software. MDE propone que los modelos sean artefactos primarios en el ciclo de vida, permitiendo automatizar tareas repetitivas, generar código y mantener la consistencia entre diferentes niveles de representación. Estudios recientes destacan que los enfoques dirigidos por modelos pueden mejorar la calidad estructural del software, reducir la deuda técnica y facilitar la evolución controlada de sistemas complejos, siempre que existan metamodelos robustos y mecanismos de trazabilidad bien definidos.

La trazabilidad es un componente esencial en la modernización de sistemas críticos, ya que permite establecer relaciones explícitas entre requisitos, modelos, código y artefactos de prueba. La ausencia de trazabilidad incrementa el riesgo de inconsistencias, dificulta el análisis de impacto y limita la capacidad de auditar cambios, especialmente en sectores regulados. MDE contribuye a mitigar estos problemas mediante la definición formal de metamodelos y la automatización de transformaciones, lo que facilita la sincronización entre artefactos y reduce la dependencia de procesos manuales propensos a errores. La literatura señala que esta capacidad de mantener alineados los diferentes niveles de abstracción es clave para garantizar la confiabilidad y la evolución sostenible de sistemas críticos (Taibi et al., 2018).

La automatización es otro pilar fundamental en la modernización. En arquitecturas tradicionales, gran parte del esfuerzo se destina a tareas manuales como refactorización, migración de componentes, validación de artefactos y sincronización entre versiones. En contraste, MDE permite automatizar transformaciones, generación de código y validaciones estructurales, lo que reduce el esfuerzo operativo y mejora la consistencia arquitectónica. Sin embargo, la efectividad de la automatización depende de la calidad de los metamodelos, la disciplina metodológica y la integración con prácticas DevOps, especialmente en entornos donde la continuidad operativa es crítica (Bass et al., 2015).

Finalmente, la deuda técnica constituye un factor determinante en la necesidad de modernización. Sistemas heredados suelen acumular deuda estructural debido a decisiones arquitectónicas históricas, falta de estandarización y ausencia de mecanismos de control. MDE ofrece herramientas para identificar, reducir y prevenir deuda técnica mediante análisis estructurales, refactorización automatizada y generación sistemática de artefactos consistentes. La literatura coincide en que, cuando se implementa bajo una gobernanza sólida, MDE puede convertirse en un habilitador clave para la modernización sostenible de sistemas críticos, permitiendo equilibrar estabilidad operativa y capacidad de evolución.

RESULTADOS

Los resultados del estudio permiten identificar patrones consistentes sobre el impacto de la Ingeniería Dirigida por Modelos en la modernización de sistemas críticos, especialmente en relación con la reducción de deuda técnica, la mejora de la trazabilidad y la automatización de procesos de ingeniería. La revisión sistemática y el análisis comparativo muestran que MDE ofrece ventajas significativas frente a enfoques tradicionales, aunque su efectividad depende de la calidad de los metamodelos, la disciplina metodológica y la integración con prácticas DevOps. Los casos documentados confirman que MDE puede mejorar la consistencia arquitectónica y acelerar la evolución del software en dominios donde la confiabilidad y la auditabilidad son esenciales.

Impacto de MDE en atributos de calidad.

El análisis basado en el modelo (ISO/IEC, 2011) evidencia que MDE contribuye de manera significativa a mejorar atributos clave como modularidad, analizabilidad, modificabilidad y trazabilidad. La Tabla 1 sintetiza la comparación entre enfoques tradicionales y dirigidos por modelos en relación con estos atributos.

Tabla 1

Comparación de atributos de calidad en modernización tradicional vs. MDE (basado en ISO/IEC, 2011)

Atributo de calidad	Tipo de enfoque tradicional	Tipo de enfoque MDE
Modularidad	Arquitecturas rígidas y alto acoplamiento.	Separación explícita mediante modelos y metamodelos.
Analizabilidad	Inspección manual y documentación incompleta.	Modelos formales y validaciones automáticas.
Modificabilidad	Cambios costosos y propensos a errores.	Transformaciones automáticas y sincronización entre artefactos.
Trazabilidad	Parcial o inexistente.	Relaciones explícitas entre requisitos, modelos y código.
Capacidad de prueba	Dependencia de esfuerzos manuales.	Generación automática de artefactos y validaciones estructurales.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que MDE permite abordar limitaciones estructurales presentes en sistemas críticos heredados, especialmente en lo relativo a la trazabilidad y la consistencia entre artefactos, aspectos ampliamente documentados en la literatura (Taibi et al., 2018).

Reducción de deuda técnica estructural

La deuda técnica estructural es uno de los principales motivadores de modernización en sistemas críticos. El análisis de casos revela que MDE contribuye a reducirla mediante la automatización de refactorizaciones, la generación sistemática de artefactos y la eliminación de inconsistencias entre modelos y código. La Tabla 2 resume los principales tipos de deuda técnica identificados y el grado de mitigación alcanzado mediante MDE.

Tabla

Tipos de deuda técnica y mitigación mediante MDE

Tipo de deuda técnica	Manifestación en sistemas críticos	Mitigación mediante MDE
Deuda estructural	Arquitecturas rígidas, acoplamiento excesivo	Refactorización automatizada y reorganización basada en modelos
Deuda de documentación	Artefactos desactualizados y falta de trazabilidad	Generación automática y sincronización entre modelos y documentación
Deuda de diseño	Inconsistencias entre componentes y capas	Validaciones formales y alineación entre modelos y código
Deuda de pruebas	Escasez de pruebas estructurales	Generación automática de artefactos de prueba
Deuda tecnológica	Dependencia de tecnologías obsoletas	Transformaciones que facilitan migraciones progresivas

Fuente: elaboración propia.

Los resultados confirman que MDE no elimina completamente la deuda técnica, pero sí reduce su acumulación y facilita su gestión sistemática, especialmente cuando se integra con prácticas DevOps y pipelines de automatización (Bass et al., 2015).

Efectos en la evolución y sostenibilidad del sistema

El análisis comparativo muestra que los enfoques dirigidos por modelos permiten acelerar los ciclos de evolución al reducir el esfuerzo manual y mejorar la consistencia entre artefactos. Los casos documentados evidencian mejoras en tiempos de despliegue, reducción de errores en cambios estructurales y mayor capacidad para auditar modificaciones, aspectos críticos en sectores regulados. La evidencia coincide con estudios que destacan el papel de MDE como habilitador de evolución sostenible en sistemas complejos.

En conjunto, los resultados indican que MDE constituye un enfoque viable y eficaz para la modernización de sistemas críticos, siempre que se implemente bajo una gobernanza técnica sólida, con metamodelos bien definidos y mecanismos de trazabilidad integrados.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten interpretar de manera integrada el papel de la Ingeniería Dirigida por Modelos en la modernización de sistemas críticos, destacando tanto sus beneficios como las condiciones necesarias para su adopción efectiva. La evidencia muestra que MDE contribuye a mejorar atributos de calidad fundamentales, especialmente modularidad, trazabilidad y modificabilidad, lo que coincide con los principios establecidos en ISO/IEC, 2011. Esta mejora se traduce en una reducción significativa de la deuda técnica estructural, particularmente en sistemas con arquitecturas rígidas y alta dependencia de procesos manuales. Sin embargo, los beneficios observados no son automáticos ni universales; dependen de la calidad de los metamodelos, la disciplina metodológica y la integración con prácticas de ingeniería contemporáneas.

Estos beneficios se alinean con tendencias contemporáneas de modernización arquitectónica, donde enfoques como microservicios buscan mejorar la modularidad, la independencia de despliegue y la capacidad de evolución. Newman (2015) y Richardson (2018) destacan que la transición desde arquitecturas monolíticas hacia estilos más desacoplados requiere mecanismos sólidos de trazabilidad y automatización, elementos que MDE puede proporcionar de manera nativa.

Los casos analizados evidencian que MDE facilita la evolución sostenible de sistemas críticos al permitir la sincronización entre modelos y código, la automatización de transformaciones y la generación sistemática de artefactos. No obstante, también se identifican desafíos importantes. La adopción de MDE requiere inversión inicial en capacitación, herramientas y gobernanza técnica, así como un esfuerzo significativo para definir metamodelos robustos y mecanismos de trazabilidad confiables. En entornos críticos, donde la estabilidad operativa es prioritaria, estos requisitos pueden generar resistencia organizacional o retrasos en la adopción.

La Tabla 3 sintetiza los principales beneficios y desafíos identificados, proporcionando una visión equilibrada del impacto de MDE en la modernización de sistemas críticos. Esta síntesis permite comprender que MDE no debe interpretarse como una solución universal, sino como un habilitador estratégico cuya efectividad depende de su implementación dentro de un marco de gobernanza sólido y alineado con las necesidades del dominio.

Tabla 3

Beneficios y desafíos de MDE en sistemas críticos

Aspecto	Beneficios observados	Desafíos identificados
Calidad estructural	Mejora de modularidad, trazabilidad y consistencia	Dependencia de metamodelos robustos y bien definidos
Automatización	Reducción de tareas manuales y errores operativos	Requiere herramientas maduras e integración con pipelines existentes
Evolución del sistema	Aceleración de ciclos de cambio y reducción de riesgos	Inversión inicial alta en capacitación y adaptación organizacional
Deuda técnica	Disminución de deuda estructural y documental	Limitaciones cuando existen arquitecturas extremadamente rígidas
Gobernanza técnica	Mejor control y auditabilidad de artefactos	Necesidad de disciplina metodológica y supervisión continua

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

La modernización de sistemas críticos exige enfoques capaces de gestionar la complejidad estructural, reducir la deuda técnica acumulada y garantizar niveles elevados de confiabilidad, trazabilidad y auditabilidad. Los hallazgos de este estudio muestran que la Ingeniería Dirigida por Modelos constituye un habilitador estratégico para alcanzar estos objetivos, al proporcionar mecanismos formales de abstracción, automatización y sincronización entre artefactos que no están presentes en enfoques tradicionales centrados exclusivamente en el código. La evidencia recopilada indica que MDE mejora atributos de calidad fundamentales definidos por ISO/IEC, 2011, especialmente modularidad, analizabilidad, modificabilidad y trazabilidad, lo que se traduce en una evolución más controlada y sostenible de sistemas críticos.

Sin embargo, los beneficios de MDE no se materializan de manera automática. Su efectividad depende de la calidad de los metamodelos, la disciplina metodológica, la integración con prácticas DevOps y la existencia de una gobernanza técnica sólida. Los casos analizados demuestran que, cuando estas condiciones están presentes, MDE permite reducir la deuda técnica estructural, automatizar tareas repetitivas y mejorar la consistencia arquitectónica, contribuyendo a ciclos de evolución más ágiles y seguros. En contraste, implementaciones sin una base metodológica clara o sin mecanismos de trazabilidad robustos pueden generar complejidad adicional o limitar los beneficios esperados.

En conjunto, los resultados permiten concluir que MDE es un enfoque viable y eficaz para la modernización de sistemas críticos, siempre que se adopte como parte de una estrategia integral que combine herramientas, procesos, gobernanza y capacidades organizacionales. Su aplicación adecuada no solo facilita la transformación tecnológica, sino que también fortalece la sostenibilidad operativa y la capacidad de adaptación en dominios donde la estabilidad y la confiabilidad son esenciales.

REFERENCIAS

Bass, L., Weber, I., & Zhu, L. (2015). DevOps: A software architect's perspective. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0134049847

Brambilla, M., Cabot, J., & Wimmer, M. (2017). Model-driven software engineering in practice (2nd ed.). Morgan & Claypool. <https://doi.org/10.2200/S00751ED2V01Y201701SWE004>

France, R., Bieman, J., & Cheng, B. H. (2006). Repositorio para el desarrollo guiado por modelos (ReMoDD). International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (pp. 311–317). Springer.

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. <https://www.iso.org/standard/35733.html>

Newman, S. (2015). Building microservices: Designing fine-grained systems. O'Reilly Media. ISBN 978-1491950357

Richardson, C. (2018). Microservices patterns: With examples in Java. Manning Publications. ISBN 978-1617294549

Sendall, S., & Kozaczynski, W. (2003). Model transformation: The heart and soul of model-driven software development. IEEE Software, 20(5), 42–45. <https://doi.org/10.1109/MS.2003.1231150>

Taibi, D., Lenarduzzi, V., & Pahl, C. (2018). Architectural patterns for microservices: A systematic mapping study. Proceedings of the 8th International Conference on Cloud Computing and Services Science, 221–232. <https://doi.org/10.5220/0006798302210232>

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 