Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/87fd4x96

Gemelos digitales (Digital twins) e IA para la evaluación de la integridad estructural y vida a la fatiga

Digital Twins and AI for Structural Integrity and Fatigue Life Assessment

Gemelli digitali (Digital twins) e IA per la valutazione dell'integrità strutturale e della vita a fatica

Herrera Carrera Diego Dario[I]
dherrerac12@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8878-9490
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Sánchez Farías Andrés Arom[I]
asanchezf12@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3732-2906
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Sánchez Delgado David Aaron[I]
dsanchezd5@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2489-1081
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Mora Gómez José Guillermo[I]
jmorag9@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1993-4106
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguín Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Correspondencia: dherrerac12@unemi.edu.ec

.

Gemelos digitales (Digital twins) e IA para la evaluación de la integridad estructural y vida a la fatiga

Artículo de Investigación

Aceptado: 27/Noviembre/2026 **Publicado:** 28/Noviembre/2026

I. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

Resumen

La fatiga es una causa frecuente de falla en estructuras metálicas sometidas a cargas cíclicas. Los métodos clásicos de estimación de vida, basados en curvas S-N, la regla de Palmgren-Miner y la ley de Paris, emplean parámetros fijos y rara vez se actualizan con el comportamiento real en servicio. El objetivo de este trabajo fue analizar cómo los gemelos digitales apoyados en inteligencia artificial (IA) contribuyen a la evaluación de la integridad estructural y a la gestión del mantenimiento predictivo en estructuras metálicas sometidas a fatiga. Se realizó una revisión narrativa con búsqueda estructurada por palabras clave en buscadores académicos, principalmente Google Scholar, con verificación en los portales de los editores, para el periodo 2011-2026. Se analizaron 18 estudios primarios, clasificados según su enfoque (gemelo digital completo o módulo integrable), técnica de IA y nivel de evidencia. Doce estudios plantean un marco de gemelo digital y seis desarrollan algoritmos que podrían integrarse en uno. Las redes bayesianas fueron la técnica más frecuente (7 de 18); las redes neuronales informadas por la física aparecieron en dos estudios y la lógica difusa en uno, que no forma parte de un gemelo completo. Dos estudios usaron datos de estructuras reales, ambos para detectar daño; ninguno validó en servicio una predicción de vida a la fatiga. Los resultados sugieren que los gemelos digitales tienen potencial para actualizar el pronóstico de vida remanente y planificar el mantenimiento según la condición real, aunque se requieren validaciones industriales adicionales.

Palabras clave: gemelo digital; fatiga; integridad estructural; mantenimiento predictivo; inteligencia artificial.

Abstract

Fatigue is a frequent cause of failure in metallic structures subjected to cyclic loading. Classical life estimation methods, based on S-N curves, the Palmgren-Miner rule and Paris' law, use fixed parameters and are rarely updated with the actual behavior of the structure in service. The aim of this work was to analyze how digital twins supported by artificial intelligence (AI) contribute to structural integrity assessment and predictive maintenance management in metallic structures subjected to fatigue. A narrative review with a structured keyword search was carried out in academic search engines, mainly Google Scholar, with verification on publishers' portals, for the period 2011-2026. Eighteen primary studies were analyzed and classified by approach (complete digital twin or integrable module), AI technique and level of evidence. Twelve studies propose a digital twin framework and six develop algorithms that could be integrated into one. Bayesian networks were the most frequent technique (7 of 18); physics-informed neural networks appeared in two studies and fuzzy logic in one, which is not part of a complete twin. Two studies used data from real structures, both to detect damage; none validated a fatigue life prediction in service. The results suggest that digital twins have potential to update the remaining useful life prognosis and

to plan maintenance according to actual condition, although further industrial validation is required.

Keywords: digital twin; fatigue; structural integrity; predictive maintenance; artificial intelligence.

Riassunto

La fatica è una causa frequente di cedimento nelle strutture metalliche sottoposte a carichi ciclici. I metodi classici di stima della vita, basati sulle curve S-N, sulla regola di Palmgren-Miner e sulla legge di Paris, utilizzano parametri fissi e vengono raramente aggiornati con il comportamento reale in esercizio. L'obiettivo di questo lavoro è stato analizzare come i gemelli digitali supportati dall'intelligenza artificiale (IA) contribuiscano alla valutazione dell'integrità strutturale e alla gestione della manutenzione predittiva nelle strutture metalliche soggette a fatica. È stata condotta una revisione narrativa con ricerca strutturata per parole chiave nei motori di ricerca accademici, principalmente Google Scholar, con verifica nei portali degli editori, per il periodo 2011-2026. Sono stati analizzati 18 studi primari, classificati per approccio (gemello digitale completo o modulo integrabile), tecnica di IA e livello di evidenza. Dodici studi propongono un quadro di gemello digitale e sei sviluppano algoritmi integrabili. Le reti bayesiane sono state la tecnica più frequente (7 su 18); le reti neurali informate dalla fisica sono comparse in due studi e la logica fuzzy in uno, che non fa parte di un gemello completo. Due studi hanno utilizzato dati di strutture reali, entrambi per rilevare danni; nessuno ha validato in esercizio una previsione della vita a fatica. I risultati suggeriscono che i gemelli digitali hanno il potenziale per aggiornare la prognosi della vita utile residua e pianificare la manutenzione in base alla condizione reale, sebbene siano necessarie ulteriori validazioni industriali.

Parole chiave: gemello digitale; fatica; integrità strutturale; manutenzione predittiva; intelligenza artificiale.

1. Introducción

La fatiga es el daño progresivo que sufre un metal sometido a esfuerzos variables, aun por debajo de su límite de fluencia. Avanza por nucleación de microgrietas, crecimiento de una grieta y fractura final, a menudo sin deformación visible previa (Schijve, 2009), lo que compromete la integridad estructural de puentes, fuselajes y buques. Se ha estimado con las curvas S-N, la regla de Palmgren-Miner y la ley de Paris, $da/dN = C\,(\Delta K)^m$ (Paris & Erdogan, 1963). Estas herramientas usan parámetros fijos y no consideran el orden de las cargas; por ello, el mantenimiento suele programarse con márgenes amplios o a intervalos fijos.

El gemelo digital propone cerrar esa brecha. Es una representación virtual vinculada a un activo físico durante su vida útil (Grieves & Vickers, 2017); en estructuras, Tuegel et al. (2011)

plantearon sustituir la predicción de vida basada en una flota promedio por un modelo de alta fidelidad para cada aeronave. Los sensores IoT transmiten las mediciones del activo y la inteligencia artificial (IA) detecta daño, actualiza los modelos y estima la vida útil remanente (RUL), lo que permite pasar del mantenimiento preventivo al predictivo (Errandonea et al., 2020). Sin embargo, la información está dispersa entre disciplinas: rara vez se cruzan metales, fatiga e IA dentro del gemelo, y pocas veces se distinguen los gemelos completos de los algoritmos integrables o se explicita su grado de validación. Esa brecha justifica esta revisión, relevante para la Ingeniería Industrial por su efecto en la disponibilidad, los costos y la seguridad.

La pregunta de investigación fue: **¿cómo transforman los gemelos digitales impulsados por IA la gestión del mantenimiento predictivo en estructuras metálicas sometidas a fatiga?** El **objetivo general** fue analizar el aporte de estos gemelos a la integridad estructural y a la predicción de la vida a la fatiga, con énfasis en el mantenimiento predictivo. Los **objetivos específicos** fueron: (a) identificar las arquitecturas y fuentes de datos, en especial los sensores IoT; (b) comparar las técnicas de IA según su función, datos, incertidumbre y validación; y (c) señalar vacíos y oportunidades en Ecuador y Latinoamérica. Luego se presentan la metodología (revisión narrativa con búsqueda estructurada), los resultados, la discusión y las conclusiones.

2. Metodología

Tipo y diseño de la investigación

Se realizó una revisión bibliográfica narrativa con búsqueda estructurada. No constituye una revisión sistemática: no se registró un protocolo previo, no se contabilizaron los registros de cada etapa de selección y no se aplicó una herramienta formal de riesgo de sesgo; por esa razón no se presenta un diagrama PRISMA.

Fuentes de información y periodo de búsqueda

Los estudios se identificaron mediante búsquedas por palabras clave en inglés en buscadores académicos y generales, cuyos resultados incluyeron registros de Google Scholar. Cada documento candidato se comprobó en el portal de su editor (ScienceDirect, IEEE Xplore, Springer Nature, Wiley o MDPI) o en índices como Crossref, dblp, DOAJ y PubMed. Scopus y Web of Science no se consultaron directamente. El periodo abarcó desde enero de 2011, año de la propuesta de Tuegel et al. (2011), hasta octubre de 2026; la última consulta se realizó el 19 de noviembre de 2026.

Estrategias y combinaciones de términos

Los términos, derivados de la pregunta de investigación, se agruparon en cinco ejes: gemelo digital e integridad estructural, inferencia bayesiana, aprendizaje automático y profundo, redes neuronales

informadas por la física y lógica difusa. Cada consulta combinó un término de gemelo o de fatiga con uno de la técnica (Tabla 1).

Tabla 1

Combinaciones de términos utilizadas en la identificación de estudios

Eje temático	Combinaciones de términos (en inglés)
Gemelo digital e integridad estructural	digital twin + fatigue crack growth; digital twin + fatigue life prediction; digital twin + structural health management; digital twin + damage detection + structures
Inferencia bayesiana	dynamic Bayesian network + fatigue crack; dynamic Bayesian network + digital twin + crack growth
Aprendizaje automático y profundo	machine learning + fatigue life prediction + metals; digital twin + structural health monitoring + deep learning; digital twin + IoT + bridge
Redes neuronales informadas por la física	physics-informed neural network + fatigue life; physics-informed neural network + creep-fatigue
Lógica difusa	fuzzy logic + fatigue life prediction; fuzzy sets + fatigue + residual strength

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos revisados por pares, en inglés o español, publicados entre 2011 y 2026 y con metadatos verificables. El criterio principal exigió que el estudio estimara el daño por fatiga, el crecimiento de grietas o la vida remanente de materiales o estructuras metálicas mediante un gemelo digital o un modelo de IA orientado a esa tarea. El criterio complementario admitió gemelos digitales para la detección de daño y modelos de fatiga sin material especificado, pero aplicables a metales; estos casos se señalan en las tablas y no sustentan conclusiones sobre la predicción de vida. Los criterios de exclusión se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos revisados por pares, en inglés o español, publicados entre 2011 y 2026, con DOI y metadatos verificables.	Tesis, libros de divulgación y resúmenes de congreso sin texto completo; registros duplicados o sin datos verificables.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Criterio principal: estimación del daño por fatiga, del crecimiento de grietas o de la vida remanente de estructuras metálicas con un gemelo digital o un modelo de IA.	Gemelo digital usado solo como modelo tridimensional, sin conexión con datos del activo.
Criterio complementario: gemelos digitales para la detección de daño estructural, o modelos de fatiga sin material especificado pero aplicables a metales.	Estudios centrados en compuestos, polímeros, concreto o madera.
Resumen oficial o texto completo accesible para extraer las variables del estudio.	Estudios que solo mencionan el gemelo digital o la IA, sin aplicarlos a la integridad estructural o la fatiga.

Procedimiento de selección

La pertinencia se evaluó con el título, el resumen y los metadatos del editor, y el DOI permitió evitar duplicados. El texto completo se consultó cuando estuvo disponible; en los demás casos se usó el resumen oficial y, de forma excepcional, la descripción hecha por trabajos que lo citan, lo que se indica en las notas de las tablas. El corpus quedó formado por 18 estudios primarios; otras cuatro referencias (Errandonea et al., 2020; Grieves y Vickers, 2017; Paris y Erdogan, 1963; Schijve, 2009) se citan solo como fundamento teórico.

Extracción y clasificación de datos

De cada estudio primario se extrajeron nueve variables: autores y año, material o estructura, tipo de gemelo o módulo, técnica de IA, fuente de datos, tipo de validación, resultados, métricas de desempeño y limitaciones. Los estudios se clasificaron como **gemelo digital completo o marco de gemelo**, cuando integran un activo físico, un modelo virtual y un mecanismo de actualización con datos, o como **algoritmo o módulo integrable**, cuando desarrollan un modelo que podría formar parte de un gemelo sin implementarlo. La técnica se asignó según el método que sostiene la predicción; los modelos físicos o probabilísticos sin IA explícita forman una categoría propia.

Clasificación del nivel de evidencia

Cada estudio primario se clasificó según la evidencia con que se validó: 1, datos de una estructura real; 2, ensayo de laboratorio con datos medidos; 3, demostración numérica o simulada; 4, propuesta conceptual; y ND, no determinado con la información disponible. En Karve et al. (2020) y Jiang et al. (2021) el nivel se asignó con fuentes complementarias. La escala describe qué tan cerca de la operación real se probó cada propuesta, no la calidad metodológica del artículo.

También se registró si lo validado fue la detección de daño o la predicción de vida, que no son equivalentes.

Procedimiento de análisis, síntesis y limitaciones

Los datos se organizaron en una matriz comparativa, base de la Tabla 3 y de la Figura 1. Los conteos por año, técnica y nivel de evidencia se calcularon sobre los 18 estudios primarios. La síntesis fue descriptiva, sin metaanálisis, porque los estudios abordan problemas distintos con métricas no comparables. La falta de protocolo y de registro de descartes (cifras que no se informan), la ausencia de Scopus y Web of Science y la lectura de solo el resumen en varios estudios limitan la reproducibilidad; el corpus es una muestra verificada, no exhaustiva.

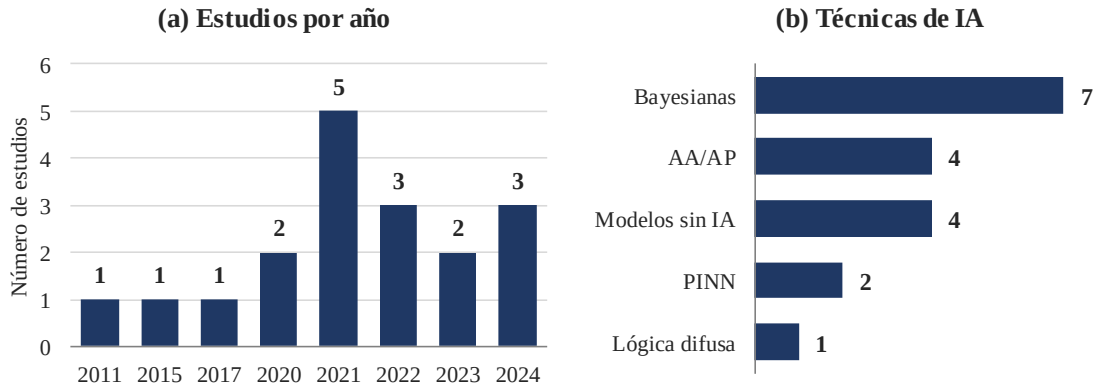
3. Resultados

Características generales de las investigaciones

Los 18 estudios primarios se publicaron entre 2011 y 2024, y 15 de ellos aparecieron a partir de 2020 (Figura 1a). Doce plantean un gemelo digital o un marco de gemelo y seis desarrollan algoritmos o módulos integrables. Predominan las estructuras aeroespaciales, seguidas por puentes, buques y probetas de laboratorio. Solo un estudio fue desarrollado en Latinoamérica (Ritto y Rochinha, 2021) y ninguno en Ecuador.

Figura 1

Distribución de los estudios primarios (n = 18): (a) por año; (b) por técnica



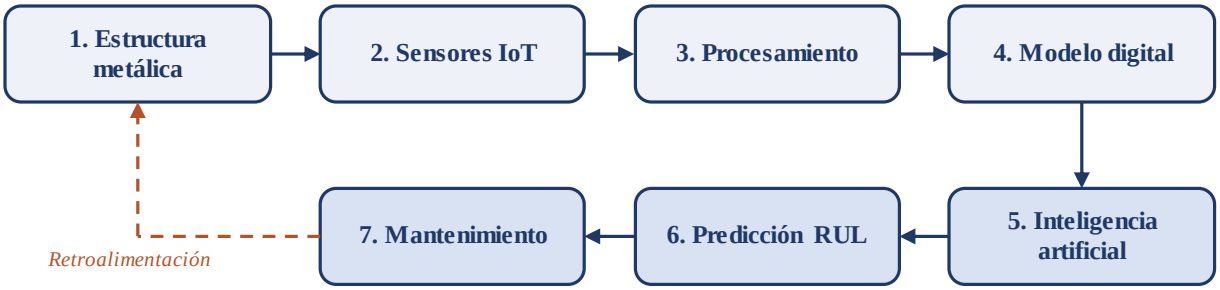
Arquitectura de los gemelos digitales y fuentes de datos

Los trabajos coinciden en tres elementos: el activo físico instrumentado, el modelo virtual y un flujo de datos en ambos sentidos, cadena que resume la Figura 2. En la capa física, Armijo y Zamora-Sánchez (2024) instalaron acelerómetros MEMS inalámbricos de bajo costo en un puente

ferroviario en servicio; tras dos años de registro, el sistema detecta anomalías de vibración. Dang et al. (2022) evaluaron un gemelo en la nube con un puente modelo y un puente real, con una exactitud de 92 % en la detección de daño, y Ye et al. (2023) reconstruyeron deformaciones con datos de sensores y validaron su esquema con ensayos de fatiga por vibración aleatoria. En la capa virtual, unos actualizan modelos físicos detallados, como el modelo multiescala de Jiang et al. (2021) para puentes de acero, y otros construyen modelos rápidos a partir de ellos (M. Wang et al., 2022; Ritto y Rochinha, 2021).

Figura 2

Arquitectura general de un gemelo digital para el monitoreo de la fatiga



Técnicas de inteligencia artificial

Las redes bayesianas e inferencia probabilística son el grupo más numeroso (7 de 18), seguidas por el aprendizaje automático y profundo (4), los modelos físicos o probabilísticos sin IA explícita (4), las redes neuronales informadas por la física o PINN (2) y la lógica difusa (1) (Figura 1b; Tabla 3). Las redes bayesianas tratan los parámetros de crecimiento de grieta como variables aleatorias que se actualizan con cada observación: C. Li et al. (2017) y Ye et al. (2020) mostraron que los datos de inspección reducen la incertidumbre del pronóstico, Kapteyn et al. (2021) propusieron una formulación escalable a flotas y S. Chen et al. (2024) añadieron un filtro de partículas adaptativo. En aprendizaje automático, Bao et al. (2021) obtuvieron un R^2 de hasta 0,99 con máquinas de vectores de soporte, valor que refleja la capacidad de entrenamiento y no la de generalización. Las PINN mostraron en X.-C. Zhang et al. (2021), para fluencia-fatiga del acero inoxidable 316, y en Zhou et al. (2023), en versión probabilística, mayor exactitud que las redes basadas solo en datos. La lógica difusa aparece solo en Y. Zhang (2015), fuera de un gemelo.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1858-1871, ISSN: 3103 – 1315

Tabla 3

Síntesis de los estudios primarios por técnica (n = 18)

Técnica	n	Estudios [nivel de evidencia]	Hallazgo principal	Limitación
Bayesianas	7	C. Li et al. (2017) [3]; Karve et al. (2020) [2]; Ye et al. (2020) [3]; Kapteyn et al. (2021) [3]; M. Wang et al. (2022) [ND]; Ye et al. (2023) [2]; S. Chen et al. (2024) [2]	Actualizan parámetros y reducen la incertidumbre	Requieren modelo físico; máximo: laboratorio
AA/AP	4	Bao et al. (2021) [2]; Ritto y Rochinha (2021) [3]; Dang et al. (2022) [1]; Armijo y Zamora-Sánchez (2024) [1]	R^2 hasta 0,99 (laboratorio); daño detectado (92 %)	Con datos reales no predicen vida
Modelos sin IA	4	Tuegel et al. (2011) [4]; Jiang et al. (2021) [2]; VanDerHorn et al. (2022) [ND]; X. Li et al. (2024) [3]	Vida por activo; grietas multiescala	Conceptual o validación parcial
PINN	2	X.-C. Zhang et al. (2021) [2]; Zhou et al. (2023) [2]	Más exactas con pocos datos	Sin integración en gemelos
Lógica difusa	1	Y. Zhang (2015) [3]	Incertidumbre en la regla de Miner	Fuera de un gemelo

Evidencia experimental frente a simulación

Dos estudios usaron datos de estructuras reales (Armijo y Zamora-Sánchez, 2024; Dang et al., 2022), ambos para detectar daño o anomalías; siete reportan validación de laboratorio, seis son numéricos o simulados, uno es conceptual (Tuegel et al., 2011) y en dos el nivel no pudo determinarse. Ninguno validó en servicio una predicción de vida a la fatiga.

Relación con el mantenimiento predictivo

Los estudios proponen el gemelo para individualizar la vida remanente de cada activo (Tuegel et al., 2011; VanDerHorn et al., 2022), reducir la incertidumbre del pronóstico a medida que llegan datos (C. Li et al., 2017; Ye et al., 2020) y planificar la operación sin superar la tolerancia al daño (Karve et al., 2020). Su beneficio aún no se ha demostrado en estructuras en servicio.

4. Discusión

Los resultados responden a la pregunta de investigación con un matiz importante. Los gemelos digitales apoyados en IA pueden cambiar la lógica del mantenimiento de estructuras metálicas

sometidas a fatiga, porque convierten una predicción estática, hecha en el diseño, en un pronóstico que se actualiza con la historia de cada componente. Sin embargo, la evidencia de que ese cambio ya ocurre en la industria es escasa: solo dos de los 18 estudios primarios trabajaron con datos de estructuras reales, ambos para detectar daño o anomalías, y ninguno validó en servicio una predicción de vida a la fatiga.

La preferencia por las redes bayesianas tiene una explicación técnica. Encajan con la ley de Paris, porque *C* y *m* pueden tratarse como variables con distribución de probabilidad que se corrigen con cada medición de grieta, y entregan junto con la predicción una medida de su confianza (Kapteyn et al., 2021; C. Li et al., 2017). Esa confianza depende de las distribuciones supuestas y del modelo físico elegido, de modo que un intervalo estrecho no garantiza que el modelo sea correcto. Además, requieren un modelo físico previo y su inferencia en línea puede ser costosa; S. Chen et al. (2024) señalan el ruido de las mediciones y el tiempo de cálculo como limitaciones. Las PINN ocupan un punto intermedio: restringen las redes neuronales con conocimiento físico y rinden bien con pocos datos (X.-C. Zhang et al., 2021), pero ninguna del corpus se integró en un gemelo ni se validó en servicio, y su función de pérdida exige decidir qué leyes físicas imponer y con qué peso. Frente a las redes bayesianas ofrecen menos información sobre la incertidumbre, salvo la versión probabilística de Zhou et al. (2023), aunque requieren menos supuestos sobre la forma del modelo de daño. Usar una PINN como modelo de predicción y una actualización bayesiana para corregir sus parámetros es una complementariedad que la literatura revisada todavía no ha explorado en gemelos para fatiga.

Los modelos basados solo en datos muestran ajustes muy altos en el laboratorio, pero el valor de 0,99 de Bao et al. (2021) refleja la capacidad de entrenamiento y no garantiza el mismo desempeño con piezas o condiciones nuevas. Zhou et al. (2023) advierten que los enfoques puramente basados en datos pueden contradecir el conocimiento físico, lo que limita su uso en integridad estructural. El aprendizaje automático y profundo resulta apropiado cuando existe monitoreo continuo y grandes volúmenes de datos (Armijo y Zamora-Sánchez, 2024; Dang et al., 2022), pero detectar un cambio no equivale a pronosticar cuánto falta para la falla. Por ello no puede afirmarse que una técnica sea superior en general: la elección depende de los datos disponibles, de la necesidad de cuantificar incertidumbre y del uso que se dará a la predicción.

La escasa presencia de la lógica difusa admite varias explicaciones: la incertidumbre de la fatiga se ha tratado sobre todo con herramientas probabilísticas, que se combinan con facilidad con la ley de Paris; sus reglas, definidas por expertos, son difíciles de actualizar con datos de sensores; y la incertidumbre difusa no se traduce directamente en una probabilidad de falla, que es la magnitud que suelen exigir los criterios de tolerancia al daño. Aun así, Y. Zhang (2015) muestra que los conjuntos difusos permiten representar la incertidumbre de los parámetros en la regla de Miner. Los autores proponen, como hipótesis y no como resultado del corpus, usarla para combinar el

juicio de los inspectores con las lecturas de sensores o para expresar el pronóstico en niveles de riesgo comprensibles para el personal de planta.

El nivel de evidencia condiciona el alcance de estos resultados. Una simulación controla las cargas, el ruido y el modelo verdadero; un ensayo de laboratorio añade la variabilidad del material en condiciones conocidas; una estructura en servicio agrega cargas variables, temperatura, corrosión, fallas de sensores e interrupciones de comunicación. Varios de los estudios mejor desarrollados, como los de C. Li et al. (2017), Ye et al. (2020) y Kapteyn et al. (2021), se demostraron con datos numéricos o simulados, por lo que su desempeño en planta aún debe comprobarse. El corpus muestra una separación clara: los gemelos que predicen vida a la fatiga se encuentran en laboratorio o simulación, y los que operan en estructuras reales se limitan a detectar anomalías.

La calidad de los sensores y la actualización de los modelos son los desafíos técnicos más repetidos. Un gemelo es tan confiable como los datos que recibe: la deriva de las galgas, el ruido de los acelerómetros y los vacíos de transmisión se propagan hacia el pronóstico, y cuando la estructura cambia por reparaciones, corrosión o variaciones de uso, el modelo debe recalibrarse con procedimientos que la literatura todavía no estandariza. En las pequeñas y medianas empresas se suma que muchas implementaciones provienen de programas aeroespaciales con alta capacidad de cómputo; una empresa mediana necesitaría instrumentar los puntos críticos, garantizar la conectividad, calibrar un modelo de daño para sus materiales y contar con personal capaz de interpretar el pronóstico. Los acelerómetros MEMS de bajo costo (Armijo y Zamora-Sánchez, 2024) abaratan los sensores, pero no resuelven la falta de modelos calibrados ni de datos históricos.

Esta revisión tiene limitaciones: no se consultaron directamente Scopus ni Web of Science, no se contabilizaron los registros de cada etapa y, en varios estudios, la información se obtuvo del resumen; por eso dos estudios quedaron sin nivel de evidencia y en seis no se pudo confirmar el material. Los conteos describen solo los documentos analizados.

Vacíos de conocimiento y perspectivas futuras

Se identificaron cuatro vacíos: la validación en servicio de la predicción de vida; la distancia entre los gemelos que detectan daño con datos reales y los que predicen vida con datos simulados o de laboratorio; la falta de estándares para intercambiar datos y verificar modelos; y la escasa atención a las cargas de amplitud variable, la fatiga multiaxial y los ambientes corrosivos, condiciones frecuentes en la industria. Como líneas futuras se proponen gemelos híbridos que combinen PINN con actualización bayesiana y la lógica difusa como capa de apoyo a la decisión.

Posibles aplicaciones en Ecuador y Latinoamérica

El corpus no incluye implementaciones en Ecuador, y el único estudio latinoamericano aborda la detección de daño con datos simulados (Ritto y Rochinha, 2021). Como propuesta de los autores,

y no como aplicación documentada, estas herramientas podrían evaluarse en puentes metálicos de la red vial, equipos de ingenios azucareros sometidos a cargas cíclicas durante la zafra, estructuras de plantas industriales, grúas y puentes grúa, sistemas de transporte y tanques expuestos a los ambientes corrosivos de la costa. Un prototipo de bajo costo requeriría identificar los puntos críticos mediante elementos finitos o inspección, instrumentarlos con galgas o acelerómetros MEMS conectados a microcontroladores, calibrar una ley de Paris con ensayos del material local, disponer de una plataforma de series de tiempo y validar primero en el laboratorio de la universidad. Lo realista es comenzar por detectar cambios en la respuesta estructural y avanzar después hacia la predicción de vida.

5. Conclusiones

La evidencia analizada indica que los gemelos digitales apoyados en inteligencia artificial pueden modificar la gestión de la fatiga en estructuras metálicas, porque permiten que la estimación de la vida útil deje de ser un cálculo único hecho en el diseño y se convierta en un pronóstico que se actualiza con los datos de cada componente. En respuesta a la pregunta de investigación, su principal aporte potencial al mantenimiento predictivo es la posibilidad de programar inspecciones y reparaciones según la condición estimada de cada activo y no según intervalos fijos.

Dentro del corpus analizado, las redes bayesianas fueron la técnica más utilizada, sobre todo por su capacidad para actualizar los parámetros del crecimiento de grietas y cuantificar la incertidumbre. Las redes neuronales informadas por la física mostraron buen desempeño con pocos datos en ensayos de laboratorio, aunque todavía no se han integrado en gemelos completos dentro del corpus. La lógica difusa, presente en un solo estudio, no tiene por ahora un papel documentado dentro de gemelos digitales para fatiga.

La evidencia todavía es limitada. La mayoría de las propuestas se demostró con simulaciones o ensayos de laboratorio; los dos estudios con datos de estructuras reales validaron la detección de daño o anomalías, y ninguno validó en servicio la predicción de la vida a la fatiga. Estas conclusiones dependen del corpus revisado, que no es exhaustivo.

Para la Ingeniería Industrial, esta tecnología presenta potencial para mejorar la seguridad, la disponibilidad y los costos de mantenimiento, aunque esos beneficios no se han cuantificado en los estudios analizados. Su adopción en Ecuador requiere investigación aplicada con prototipos de bajo costo, ensayos de materiales locales y validación en estructuras reales, tarea que puede asumirse desde las universidades en colaboración con la industria.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1858-1871, ISSN: 3103 – 1315

Referencias

Armijo, A., y Zamora-Sánchez, D. (2024). Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a digital twin: A case study. *Sensors, 24*(7), 2115. https://doi.org/10.3390/s24072115

Bao, H., Wu, S., Wu, Z., Kang, G., Peng, X., y Withers, P. J. (2021). A machine-learning fatigue life prediction approach of additively manufactured metals. *Engineering Fracture Mechanics, 242*, 107508. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107508

Chen, S., Ma, Y., Wang, Z., Liu, M., y Wu, Z. (2024). Fatigue crack and residual life prediction based on an adaptive dynamic Bayesian network. *Applied Sciences, 14*(9), 3808. https://doi.org/10.3390/app14093808

Dang, H. V., Tatipamula, M., y Nguyen, H. X. (2022). Cloud-based digital twinning for structural health monitoring using deep learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18*(6), 3820-3830. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3115119

Errandonea, I., Beltrán, S., y Arrizabalaga, S. (2020). Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry, 123*, 103316. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316

Grieves, M., y Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt y A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7*4*

Jiang, F., Ding, Y., Song, Y., Geng, F., y Wang, Z. (2021). Digital twin-driven framework for fatigue life prediction of steel bridges using a probabilistic multiscale model: Application to segmental orthotropic steel deck specimen. *Engineering Structures, 241*, 112461. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112461

Kapteyn, M. G., Pretorius, J. V. R., y Willcox, K. E. (2021). A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale. *Nature Computational Science, 1*(5), 337-347. https://doi.org/10.1038/s43588-021-00069-0

Karve, P. M., Guo, Y., Kapusuzoglu, B., Mahadevan, S., y Haile, M. A. (2020). Digital twin approach for damage-tolerant mission planning under uncertainty. *Engineering Fracture Mechanics, 225*, 106766. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106766

Li, C., Mahadevan, S., Ling, Y., Choze, S., y Wang, L. (2017). Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin. *AIAA Journal, 55*(3), 930-941. https://doi.org/10.2514/1.J055201

Li, X., Li, G., y Bi, Z. (2024). Digital twins to predict crack propagation of sustainable engineering materials under different loads. *Machines, 12*(2), 125. https://doi.org/10.3390/machines12020125

Paris, P., y Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering, 85*(4), 528-533. https://doi.org/10.1115/1.3656900

Ritto, T. G., y Rochinha, F. A. (2021). Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing, 155*, 107614. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107614

Schijve, J. (2009). *Fatigue of structures and materials* (2.ª ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6808-9

Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., y Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering, 2011*, 154798. https://doi.org/10.1155/2011/154798

VanDerHorn, E., Wang, Z., y Mahadevan, S. (2022). Towards a digital twin approach for vessel-specific fatigue damage monitoring and prognosis. *Reliability Engineering & System Safety, 219*, 108222. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108222

Wang, M., Feng, S., Incecik, A., Królczyk, G., y Li, Z. (2022). Structural fatigue life prediction considering model uncertainties through a novel digital twin-driven approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 391*, 114512. https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114512

Ye, Y., Yang, Q., Yang, F., Huo, Y., y Meng, S. (2020). Digital twin for the structural health management of reusable spacecraft: A case study. *Engineering Fracture Mechanics, 234*, 107076. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107076

Ye, Y., Yang, Q., Zhang, J., Meng, S., y Wang, J. (2023). A dynamic data driven reliability prognosis method for structural digital twin and experimental validation. *Reliability Engineering & System Safety, 240*, 109543. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109543

Zhang, X.-C., Gong, J.-G., y Xuan, F.-Z. (2021). A physics-informed neural network for creep-fatigue life prediction of components at elevated temperatures. *Engineering Fracture Mechanics, 258*, 108130. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108130

Zhang, Y. (2015). A fuzzy residual strength based fatigue life prediction method. *Structural Engineering and Mechanics, 56*(2), 201-221. https://doi.org/10.12989/sem.2015.56.2.201

Zhou, T., Jiang, S., Han, T., Zhu, S.-P., y Cai, Y. (2023). A physically consistent framework for fatigue life prediction using probabilistic physics-informed neural network. *International Journal of Fatigue, 166*, 107234. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107234