

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2418>

Metodologías para la evaluación de la integridad estructural de infraestructuras civiles en la industria del petróleo y gas: una revisión sistemática de la literatura científica

Methodologies for Assessing the Structural Integrity of Civil Infrastructure in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review of the Scientific Literature

Lesly Mishell González Boada

<https://orcid.org/0009-0004-1782-9867>

Universidad Estatal Península De Santa Elena
Facultad De Ciencias De La Ingeniería Instituto De Postgrado

Artículo recibido: 10 julio 2026- Aceptado para publicación: 16 agosto 2026

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La evaluación de la integridad estructural constituye un componente relevante para preservar la seguridad y continuidad operativa de las infraestructuras vinculadas con la industria del petróleo y gas. El estudio tuvo como objetivo analizar las metodologías utilizadas para evaluar la integridad estructural mediante una revisión sistemática de la literatura científica. Se aplicó un enfoque cualitativo, alcance descriptivo-documental y diseño no experimental, siguiendo las directrices PRISMA 2020 para la identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de publicaciones. La revisión consideró 15 artículos científicos seleccionados según criterios de pertinencia temática, periodo de publicación y relación con las metodologías de evaluación estructural. Los hallazgos identificaron cinco líneas principales: elementos finitos, modelos semiempíricos, métodos probabilísticos, análisis estadístico e inteligencia artificial. La corrosión representó el mecanismo de deterioro con mayor presencia en los estudios, mientras la presión de falla, resistencia residual, confiabilidad y vida útil figuraron entre los principales parámetros analizados. Los elementos finitos mostraron amplia aplicación para representar defectos y estudiar la respuesta estructural de tuberías. Los métodos probabilísticos incorporaron incertidumbres asociadas con las variables de evaluación, mientras las redes neuronales y el aprendizaje automático se orientaron hacia la detección de fallas y predicción del comportamiento estructural. La revisión identificó una tendencia hacia métodos híbridos que integran simulación, información de inspección, confiabilidad e inteligencia artificial para apoyar la gestión de integridad de infraestructuras del sector.

Palabras clave: integridad estructural, industria petrolera, corrosión, elementos finitos, inteligencia artificial

ABSTRACT

Structural integrity assessment is a relevant component for preserving the safety and operational continuity of infrastructure associated with the oil and gas industry. The study aimed to analyze the methodologies used to assess structural integrity through a systematic review of the scientific literature. A qualitative approach, descriptive-documentary scope, and non-experimental design were applied, following the PRISMA 2020 guidelines for the identification, screening, eligibility, and inclusion of publications. The review considered 15 scientific articles selected according to thematic relevance, publication period, and relationship with structural assessment methodologies. The findings identified five main approaches: finite element methods, semi-empirical models, probabilistic methods, statistical analysis, and artificial intelligence. Corrosion was the most frequently addressed deterioration mechanism, while failure pressure, residual strength, reliability, and service life were among the main parameters analyzed. Finite element methods were widely applied to represent defects and examine the structural response of pipelines. Probabilistic methods incorporated uncertainties associated with assessment variables, while neural networks and machine learning focused on failure detection and structural behavior prediction. The review identified a trend toward hybrid methods that integrate simulation, inspection data, reliability, and artificial intelligence to support infrastructure integrity management in the oil and gas sector.

Keywords: structural integrity, oil industry, corrosion, finite elements, artificial intelligence

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 industria del petróleo y gas requiere una amplia infraestructura para desarrollar las actividades de extracción, transporte, almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos. Dentro de estos sistemas se encuentran ductos terrestres o submarinos, plataformas costa afuera, tanques de almacenamiento, cimentaciones, estructuras metálicas e instalaciones de procesamiento expuestas a condiciones operativas exigentes. Los periodos prolongados de servicio pueden favorecer la aparición de daños capaces de reducir la resistencia de los componentes. (Bhushan & Tewari, 2023) señalan que la detección y localización temprana de alteraciones estructurales constituyen aspectos relevantes dentro del monitoreo de ductos, debido a la necesidad de reconocer defectos antes de alcanzar condiciones que comprometan la operación.

La corrosión representa uno de los principales mecanismos asociados con la pérdida de integridad en infraestructuras destinadas al transporte de hidrocarburos. Este fenómeno produce reducción del espesor del material, alteraciones geométricas o concentraciones de esfuerzos que pueden disminuir la capacidad resistente de los componentes afectados. La corrosión puede presentarse de forma uniforme o localizada, tanto en superficies internas como externas, mientras otros factores relacionados con presión, soldaduras, propiedades del material o condiciones ambientales pueden intervenir en el deterioro. (Velázquez et al., 2022) estudiaron defectos de corrosión interna localizada en tuberías de petróleo y gas mediante datos obtenidos de inspecciones. Los autores analizaron las características estadísticas de estos defectos, aspecto relevante para establecer la condición de las tuberías a partir de las pérdidas de material identificadas.

La evaluación de la integridad estructural constituye un recurso para establecer las condiciones de servicio de una infraestructura, identificar posibles daños y estimar su capacidad resistente. Las metodologías disponibles incluyen inspección visual, ensayos no destructivos, monitoreo estructural, análisis de corrosión, modelos determinísticos, métodos probabilísticos, estudios de confiabilidad o simulaciones mediante elementos finitos. (Bhushan & Tewari, 2023) exponen diversas técnicas aplicadas al monitoreo de ductos de petróleo y gas, entre ellas sensores, sistemas ópticos, procesamiento de señales y tecnologías de detección. La elección del procedimiento depende del defecto estudiado, las características de la estructura, las condiciones de operación o el nivel de información requerido.

Los métodos numéricos ocupan un lugar relevante dentro de estas evaluaciones debido a las posibilidades que ofrecen para representar el comportamiento de estructuras con pérdidas de material. El método de elementos finitos permite analizar variables relacionadas con esfuerzos, deformaciones, presión de falla o capacidad resistente mediante modelos que reproducen diferentes condiciones estructurales. (Cabral et al., 2022), desde Brasil, estudiaron tuberías afectadas por corrosión mediante modelos de elementos finitos basados en el River-Bottom

Profile. La propuesta utiliza información asociada con la geometría irregular del defecto para representar las pérdidas de material, lo cual aporta una alternativa ante modelos sustentados en geometrías simplificadas.

Otro componente de interés corresponde al tratamiento de la incertidumbre presente durante la evaluación estructural. Las dimensiones de los defectos, propiedades mecánicas del material, tasas de corrosión o cargas operativas pueden presentar variaciones capaces de modificar las estimaciones de seguridad. (Estrella, 2023), investigador vinculado con instituciones brasileñas, abordaron la evaluación probabilística de tuberías con corrosión compleja mediante información del perfil del defecto. El análisis incorporó criterios de confiabilidad para estudiar la influencia de las pérdidas de material sobre la seguridad de las tuberías, considerando la incertidumbre asociada con los parámetros empleados en la evaluación.

Los enfoques probabilísticos aportan una perspectiva distinta respecto de los métodos determinísticos utilizados para valorar defectos por corrosión. La profundidad máxima de una pérdida de material no siempre representa la geometría completa del daño ni permite describir todas las condiciones relacionadas con la resistencia del componente. Las variaciones derivadas de la medición, extensión o evolución del defecto pueden modificar la estimación de la capacidad estructural. Khan et al., (2021) analizaron información procedente de inspecciones de tuberías de petróleo y gas en México, mediante un estudio estadístico de defectos internos causados por corrosión. Este tipo de análisis aporta información para caracterizar la distribución del daño e incorporar la variabilidad de los defectos dentro de los procesos de evaluación.

La incorporación de inteligencia artificial y aprendizaje automático constituye otra línea identificada dentro de la gestión de integridad. Estas herramientas permiten procesar información procedente de inspecciones, registros de operación o mediciones de variables estructurales con el fin de reconocer patrones vinculados con el deterioro. Lana et al., (2024) realizaron una revisión sistemática sobre aplicaciones de aprendizaje automático en la evaluación de tuberías corroidas utilizadas por la industria del petróleo y gas. El estudio identificó diferentes modelos predictivos orientados a estimar parámetros vinculados con la condición de las tuberías, lo que evidencia la incorporación de herramientas computacionales dentro de los procedimientos de evaluación.

La variedad de metodologías disponibles representa un desafío para seleccionar procedimientos acordes con las características de una infraestructura. Los ensayos no destructivos permiten localizar o dimensionar determinados defectos, mientras los elementos finitos aportan información acerca de la respuesta mecánica de los componentes. Los métodos probabilísticos incorporan la incertidumbre presente en las variables de evaluación, a diferencia del monitoreo estructural, que facilita el seguimiento de cambios durante la etapa de servicio. Estas diferencias indican que las metodologías responden a objetivos particulares, por lo cual resulta necesario examinar sus alcances, aplicaciones y limitaciones dentro de la industria del petróleo y gas.

La literatura científica presenta diferencias en los fundamentos, variables, técnicas y alcances utilizados para determinar la condición estructural. Parte de los estudios se orienta hacia la detección o caracterización de defectos, mientras otros trabajos estiman presión de falla, capacidad residual, probabilidad de falla o evolución del deterioro. Otra línea incorpora sensores, herramientas computacionales o modelos de aprendizaje automático. La diversidad de enfoques dificulta establecer una visión organizada acerca de las metodologías utilizadas, sus campos de aplicación, ventajas o limitaciones. Una revisión sistemática permite reunir esta evidencia mediante criterios definidos de búsqueda, selección y análisis de publicaciones científicas.

El objetivo de la revisión sistemática consiste en analizar las metodologías utilizadas para evaluar la integridad estructural de infraestructuras civiles vinculadas con la industria del petróleo y gas mediante la literatura científica publicada desde 2021, considerando métodos de inspección, monitoreo estructural, modelación numérica, análisis probabilístico y herramientas computacionales, con atención a sus aplicaciones, ventajas, limitaciones y líneas de desarrollo. El análisis permitirá organizar los enfoques reportados en la literatura, establecer sus principales características e identificar áreas que requieren mayor atención dentro de la evaluación de infraestructuras destinadas al sector de hidrocarburos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión se desarrolló desde un enfoque cualitativo, con alcance descriptivo-documental y diseño no experimental, orientado al análisis de publicaciones científicas relacionadas con las metodologías empleadas para evaluar la integridad estructural de infraestructuras civiles asociadas con la industria del petróleo y gas. El estudio adoptó los principios de una revisión sistemática de la literatura, debido a que este diseño permite localizar, seleccionar, organizar y examinar evidencia científica mediante criterios establecidos antes del proceso de análisis. La metodología se estructuró a partir de las directrices PRISMA 2020, utilizadas para aportar claridad al proceso de identificación, depuración, elegibilidad e inclusión de los documentos.

La búsqueda bibliográfica consideró artículos publicados entre 2021 y 2025, periodo definido para concentrar el análisis en aportes actuales sobre evaluación de integridad estructural. Se consultaron las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SciELO, debido a su cobertura de publicaciones vinculadas con ingeniería civil, ingeniería estructural, materiales, corrosión, confiabilidad e industria de hidrocarburos. Google Scholar se empleó de forma complementaria para localizar documentos que pudieran estar indexados en otras fuentes. El proceso de búsqueda se realizó durante agosto de 2025.

La estrategia de búsqueda empleó términos en español e inglés relacionados con el objeto de estudio. Entre los descriptores se consideraron: *structural integrity*, *structural integrity assessment*, *oil and gas infrastructure*, *oil and gas pipelines*, *pipeline integrity*, *structural health monitoring*, *corrosion assessment*, *non-destructive testing*, *finite element analysis*, *reliability*

analysis, civil infrastructure, así como sus equivalentes en español. Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR para ampliar o delimitar los resultados de acuerdo con las características de las bases consultadas. Una expresión general de búsqueda correspondió a: ("structural integrity" OR "structural integrity assessment") AND ("oil and gas" OR pipeline) AND (assessment OR monitoring OR inspection OR corrosion).

La población documental estuvo integrada por publicaciones científicas relacionadas con evaluación, diagnóstico, monitoreo o predicción de la integridad estructural de infraestructuras utilizadas en el sector petrolero y gasífero. La muestra estuvo constituida por los artículos que cumplieron los criterios de elegibilidad definidos para la revisión. La selección fue de tipo intencional documental, puesto que la incorporación de los estudios dependió de su relación con el tema, periodo de publicación, disponibilidad del texto completo y pertinencia metodológica.

Los criterios de inclusión contemplaron artículos originales o de revisión publicados entre 2022 y 2026; documentos procedentes de revistas científicas; publicaciones en español, inglés o portugués; investigaciones relacionadas con ductos, plataformas, estructuras metálicas, sistemas de almacenamiento u otras infraestructuras civiles del sector de petróleo y gas; estudios que abordaran métodos de inspección, ensayos no destructivos, monitoreo estructural, corrosión, elementos finitos, confiabilidad, métodos probabilísticos o herramientas computacionales. Se admitieron estudios internacionales debido a la naturaleza global del sector, aunque se otorgó atención a publicaciones desarrolladas por investigadores latinoamericanos.

Los criterios de exclusión abarcaron documentos publicados antes de 2021, tesis, libros, capítulos de libros, actas sin publicación en revista científica, documentos duplicados, trabajos sin acceso al texto requerido para efectuar el análisis y publicaciones alejadas del objeto de estudio. Se descartaron investigaciones centradas en procesos químicos, productivos o económicos de la industria petrolera cuando no presentaban relación con la evaluación de integridad estructural. Los documentos que mencionaban infraestructura petrolera sin desarrollar una metodología de evaluación, inspección, monitoreo o análisis estructural quedaron fuera de la muestra.

El proceso de selección se organizó en cuatro fases acordes con PRISMA 2020: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Durante la identificación se recopilaron los registros obtenidos mediante las bases seleccionadas. El cribado permitió eliminar duplicados y revisar títulos o resúmenes para descartar publicaciones sin relación directa con el tema. La fase de elegibilidad se apoyó en la lectura del texto completo para comprobar el cumplimiento de los criterios establecidos. La fase de inclusión reunió los artículos que conformaron la muestra definitiva para la síntesis de la evidencia.

La recolección de información se efectuó mediante una matriz de revisión documental diseñada para registrar de forma homogénea los datos relevantes de los artículos seleccionados. Las categorías contempladas fueron: autor, año de publicación, país, tipo de infraestructura,

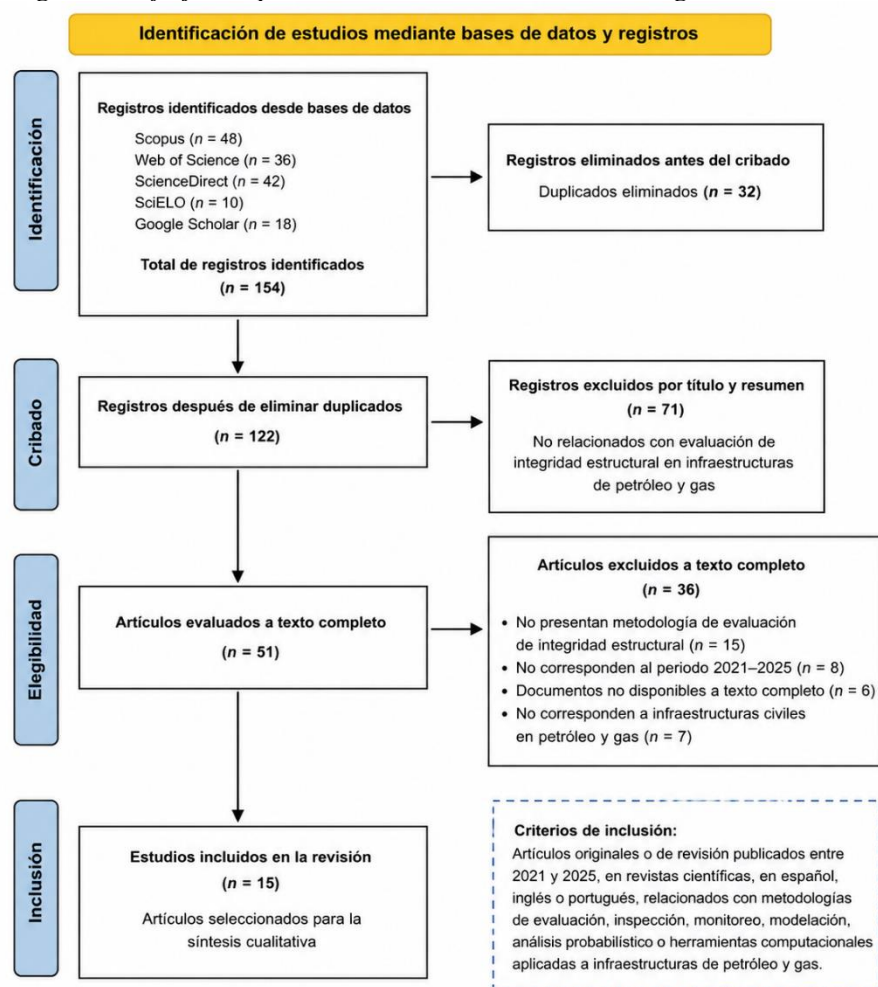
metodología de evaluación, técnica de inspección o monitoreo, mecanismo de deterioro estudiado, herramienta computacional, variables estructurales analizadas, principales hallazgos, ventajas del método y limitaciones señaladas por los autores. Esta organización permitió comparar los procedimientos utilizados e identificar tendencias dentro de la literatura seleccionada.

El análisis de la información siguió una síntesis cualitativa de contenido. Los artículos se agruparon de acuerdo con la metodología predominante: ensayos no destructivos, monitoreo de salud estructural, evaluación de corrosión, modelación mediante elementos finitos, análisis de confiabilidad, métodos probabilísticos e inteligencia artificial. Se examinaron las características de aplicación de estos enfoques, el tipo de infraestructura evaluada, las variables utilizadas, sus aportes y restricciones. La comparación entre estudios permitió establecer coincidencias, diferencias y áreas con menor desarrollo dentro de la producción científica seleccionada.

Debido al carácter documental de la revisión, no se trabajó con participantes humanos ni se aplicaron encuestas, entrevistas o procedimientos experimentales de campo. La unidad de análisis estuvo constituida por artículos científicos publicados en las fuentes seleccionadas. La trazabilidad del proceso se mantuvo mediante el registro de las estrategias de búsqueda, criterios de elegibilidad, cantidad de documentos identificados y causas de exclusión, información que puede representarse mediante el diagrama de flujo PRISMA 2020

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios según PRISMA 2020



Nota. Proceso de selección de los 15 artículos incluidos en la revisión.

La Figura 1 presenta el proceso de selección de los estudios mediante las fases establecidas por PRISMA 2020. Se identificaron 154 registros en las bases de datos consultadas, los cuales fueron depurados mediante la eliminación de duplicados, revisión de títulos y resúmenes, además de la evaluación del texto completo. Este procedimiento permitió seleccionar 15 artículos científicos que cumplieron los criterios establecidos para la revisión sistemática.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión de los 15 artículos permitió identificar diferencias en los procedimientos utilizados para valorar la integridad estructural de tuberías vinculadas con la industria del petróleo y gas. Los estudios seleccionados se concentran en cinco líneas principales: elementos finitos, modelos semiempíricos, análisis probabilístico, métodos estadísticos e inteligencia artificial. La corrosión constituye el deterioro con mayor presencia dentro de la muestra, mientras la presión de falla, capacidad resistente, confiabilidad o vida útil figuran entre los parámetros empleados para establecer el estado de los componentes.

La distribución temporal muestra seis publicaciones correspondientes a 2022, cuatro a 2023 y cinco a 2024. Esta composición permite observar continuidad en el estudio de la integridad de tuberías durante el periodo analizado. Los trabajos de 2022 presentan una presencia marcada de elementos finitos o redes neuronales, mientras los artículos de 2023 incorporan modelos de predicción, análisis ante deslizamientos o aprendizaje automático. Durante 2024 se observan propuestas vinculadas con confiabilidad, análisis probabilístico, redes neuronales o métodos híbridos. La Tabla 1 recoge las características principales de los documentos incluidos.

Tabla 1

Caracterización de los artículos seleccionados según la metodología de evaluación de integridad estructural

N.º	Autor(es) y año	Título	Metodología
1	(Velázquez, Arévalo, Díaz, & Cervantes, 2022)	Failure pressure estimation for an aged and corroded oil and gas pipeline: A finite element study	Elementos finitos, corrosión, presión de falla
2	(Cabral, Ferreira, & Pimentel, 2022)	Assessment by finite element modeling of pipelines with corrosion defects based on River-Bottom Profile model	Elementos finitos + perfil real de corrosión
3	(Torres, Motta, Afonso, & Bouchonneau, 2024)	Failure Pressure Evaluation of Corroded Pipeline Using Semi-Empirical and Finite Element Analysis	Elementos finitos + 12 modelos semiempíricos
4	(Motta, Ferreira, & Afonso, 2024)	Probabilistic assessment of complex corrosion in pipelines considering River-Bottom Profile information	Análisis probabilístico + confiabilidad
5	(Marques & Willmersdorf, 2024)	Corroded pipeline assessment using neural networks, the Finite Element Method and discrete wavelet transforms	ANN + FEM + transformada wavelet
6	(Velázquez, Valor, & Caleyó, 2024)	Statistical study of localized internal corrosion defects in oil and gas pipelines through sampling inspection	Análisis estadístico + inspección
7	(Lo & Karuppanany, 2022)	ANN- and FEA-Based Assessment Equation for a Corroded Pipeline with a Single Corrosion Defect	ANN + elementos finitos
8	(Kumar, Lo, & Karuppanan, 2022)	Empirical Failure Pressure Prediction Equations for Pipelines with Longitudinal Interacting Corrosion Defects Based on Artificial Neural Network	ANN + corrosión interactiva
9	(Alobaidi, Meguid, & Zayed, 2022)	Semi-supervised learning framework for oil and gas pipeline failure detection	Machine learning + detección de fallas
10	(Zhu, 2023)	Recent Advances in Corrosion Assessment Models for Buried Transmission Pipelines	Modelos de evaluación de corrosión

N.º	Autor(es) y año	Título	Metodología
11	(Cui, Wu, Zhongqi, & Xiao, 2023)	Studying Corrosion Failure Prediction Models and Methods for Submarine Oil and Gas Transport Pipelines	Predicción de falla + corrosión
12	(Zhang, Liu, Liu, Xu, & Li1, 2023)	Safety Analysis and Condition Assessment of Corroded Energy Pipelines under Landslide Disasters	Análisis estructural + corrosión + deslizamientos
13	(Mensah & Sriramula, 2023)	Estimation of burst pressure of pipelines with interacting corrosion clusters based on machine learning models	Machine learning + elementos finitos
14	(Shaik, Jongkittinarukorn, & Benjapolakul, 2024)	A novel neural network-based framework to estimate oil and gas pipelines life with missing input parameters	Redes neuronales + vida útil
15	(Mensah & Sriramula, 2024)	Probabilistic finite element-based reliability of corroded pipelines with interacting corrosion cluster defects	FEM probabilístico + confiabilidad

Nota. Se presentan los 15 artículos seleccionados según autor, año, título y metodología empleada para evaluar la integridad estructural en infraestructuras vinculadas con la industria del petróleo y gas.

La Tabla 1 presenta los 15 artículos que conformaron la muestra documental de la revisión sistemática. Las publicaciones abarcan el periodo 2021-2025 e incluyen diversos enfoques para evaluar la integridad estructural de tuberías asociadas con la industria del petróleo y gas. Entre las metodologías identificadas destacan los elementos finitos, modelos semiempíricos, análisis probabilístico, técnicas estadísticas, redes neuronales y aprendizaje automático. La corrosión ocupa una posición predominante entre los mecanismos de deterioro estudiados, mientras la presión de falla, confiabilidad y vida útil aparecen entre las variables utilizadas para determinar la condición de las tuberías. Esta diversidad metodológica permite establecer categorías de análisis para comparar los alcances y aplicaciones de los procedimientos encontrados en la literatura científica.

Evaluación mediante elementos finitos

El método de elementos finitos aparece entre los procedimientos con mayor presencia dentro de los artículos seleccionados. Velázquez et al. (2022) utilizaron este enfoque para estimar la presión de falla de una tubería envejecida afectada por corrosión. La representación numérica permitió estudiar el comportamiento del componente ante pérdidas de material, considerando las condiciones asociadas con el deterioro de la tubería. El estudio muestra la utilidad de la simulación para valorar escenarios donde la geometría del daño interviene sobre la resistencia disponible.

Cabral et al. (2022) abordaron la evaluación de tuberías corroídas mediante elementos finitos apoyados en el modelo *River-Bottom Profile*. Este procedimiento considera información vinculada con el perfil del defecto, aspecto que permite representar irregularidades asociadas con

la pérdida de material. La propuesta adquiere interés debido a que las zonas corroídas pueden presentar geometrías distintas a las formas simplificadas utilizadas en ciertos modelos de evaluación.

Torres et al. (2024) compararon elementos finitos con doce modelos semiempíricos para estudiar la presión de falla de tuberías corroídas. La utilización de diversos procedimientos dentro de un mismo estudio permitió examinar diferencias entre métodos de cálculo simplificados y simulaciones numéricas. Esta comparación resulta útil para reconocer que la selección de una metodología puede modificar la estimación de la resistencia residual cuando existen defectos por corrosión.

Los trabajos anteriores muestran que los elementos finitos poseen capacidad para representar geometrías, propiedades de los materiales o condiciones de carga dentro de un modelo estructural. Esta característica favorece el análisis de defectos complejos, aunque requiere información suficiente acerca del componente estudiado. La precisión de la geometría del daño constituye un aspecto relevante, debido a que una representación inadecuada puede alterar la estimación de la capacidad resistente.

Métodos probabilísticos y confiabilidad estructural

El análisis probabilístico representa otra categoría encontrada en la revisión. Motta et al. (2024) estudiaron tuberías con corrosión compleja mediante información procedente del *River-Bottom Profile*. El método incorporó variables sujetas a incertidumbre para valorar la confiabilidad del componente, ampliando el análisis respecto de procedimientos que utilizan valores únicos para representar las propiedades del material o las características del defecto.

Mensah y Sriramula (2024) emplearon elementos finitos dentro de un enfoque probabilístico destinado al estudio de tuberías con grupos de defectos por corrosión. La propuesta analiza la confiabilidad estructural considerando la interacción entre zonas deterioradas, condición relevante cuando varios defectos se encuentran próximos dentro de una misma sección. El tratamiento probabilístico permite expresar el problema mediante niveles de confiabilidad o probabilidad de falla, en lugar de limitar la evaluación a una única estimación de resistencia.

La comparación entre estos estudios muestra que los métodos probabilísticos ofrecen una alternativa para incorporar la variabilidad presente en parámetros estructurales. Las dimensiones de los defectos, propiedades mecánicas o condiciones de carga pueden presentar incertidumbre durante una evaluación real. La consideración de estas variaciones aporta información útil para establecer niveles de riesgo, priorizar intervenciones o definir periodos de inspección.

Análisis estadístico e inspección de corrosión

El análisis de información procedente de inspecciones constituye otra línea identificada. Velázquez, Valor y Caleyó (2024) estudiaron defectos de corrosión interna localizada en tuberías de petróleo y gas mediante inspección por muestreo. El tratamiento estadístico permitió

caracterizar las particularidades de los defectos registrados, aportando información sobre la distribución del deterioro dentro de las tuberías evaluadas.

Este enfoque presenta una diferencia respecto de los modelos construidos a partir de escenarios numéricos. La información obtenida durante las inspecciones refleja condiciones observadas en componentes que han permanecido en servicio, lo que aporta datos relacionados con el comportamiento del deterioro. Los registros pueden servir como insumo para modelos probabilísticos, estudios de confiabilidad o sistemas destinados a estimar la evolución de la corrosión.

La inspección adquiere una función relevante dentro de la gestión de integridad debido a que permite reconocer el estado físico de las estructuras antes de aplicar modelos de evaluación. Los datos relacionados con profundidad, longitud o distribución de los defectos pueden emplearse para determinar la capacidad residual de una tubería. La calidad de la información recopilada condiciona los análisis desarrollados durante las etapas siguientes.

Inteligencia artificial aplicada a la evaluación estructural

Las técnicas de inteligencia artificial ocupan una parte relevante de los artículos seleccionados. Lo y Karuppanan (2022) combinaron redes neuronales artificiales con elementos finitos para formular una ecuación destinada a evaluar tuberías con un defecto individual de corrosión. La integración de ambas técnicas permitió relacionar información obtenida mediante simulaciones con un modelo predictivo orientado a estimar la respuesta del componente.

Kumar et al. (2022) utilizaron redes neuronales para desarrollar ecuaciones de predicción de presión de falla en tuberías con defectos longitudinales de corrosión interactiva. El estudio amplía el análisis hacia escenarios donde varias pérdidas de material pueden influir entre sí. Esta condición resulta relevante porque la interacción entre defectos modifica la distribución de esfuerzos respecto de un daño aislado.

Alobaidi et al. (2022) abordaron la detección de fallas mediante aprendizaje semisupervisado. Este enfoque permite trabajar con información que presenta distintos niveles de clasificación, aspecto de interés ante grandes volúmenes de datos operacionales. La utilización de algoritmos de aprendizaje introduce una alternativa para identificar patrones relacionados con anomalías o condiciones de falla dentro de sistemas de transporte de hidrocarburos.

Mensah y Sriramula (2023) combinaron aprendizaje automático con elementos finitos para estimar la presión de ruptura de tuberías que presentan grupos de corrosión interactiva. El estudio refleja la integración creciente entre simulación estructural e inteligencia artificial. Los datos obtenidos mediante modelos numéricos pueden emplearse para entrenar algoritmos capaces de generar predicciones sin repetir todo el proceso de simulación para escenarios semejantes.

Shaik et al. (2024) orientaron el empleo de redes neuronales hacia la estimación de vida útil de tuberías de petróleo y gas ante la ausencia de determinados parámetros de entrada. Este planteamiento amplía el uso de inteligencia artificial desde la detección o presión de falla hacia

la predicción temporal del desempeño de la infraestructura. La disponibilidad y calidad de los datos continúa siendo un elemento importante para la aplicación de estos modelos.

Modelos de evaluación y predicción de corrosión

Zhu (2023) examinó modelos destinados a la evaluación de corrosión en tuberías enterradas de transmisión. El estudio reúne diferentes procedimientos utilizados para estimar la resistencia residual de componentes deteriorados. Las diferencias entre modelos se relacionan con los parámetros empleados para representar la geometría del defecto, las características mecánicas de la tubería o las condiciones de operación.

Cui et al. (2023) estudiaron modelos y métodos de predicción de fallas por corrosión aplicados a tuberías submarinas destinadas al transporte de petróleo y gas. El ambiente submarino incorpora condiciones particulares asociadas con exposición, presión externa o deterioro de los materiales. La predicción de fallas adquiere relevancia para establecer acciones de inspección antes de que el daño alcance niveles incompatibles con la operación segura.

Zhang et al. (2023) incorporaron otro componente al analizar tuberías corroídas expuestas a deslizamientos. El trabajo muestra que la evaluación de integridad no depende únicamente de las características internas del componente, puesto que las acciones procedentes del terreno pueden modificar la respuesta estructural. La interacción entre deterioro por corrosión y cargas geotécnicas amplía el problema hacia escenarios donde actúan varios factores sobre una misma infraestructura.

Tabla 2

Comparación de las principales metodologías identificadas

Metodología	Aplicación principal	Aporte para la evaluación	Aspecto que requiere atención
Elementos finitos	Análisis de tuberías con defectos	Representación de esfuerzos, deformaciones y presión de falla	Requiere datos geométricos y propiedades del material
Modelos semiempíricos	Estimación de resistencia residual	Facilitan cálculos de presión de falla	Pueden simplificar geometrías complejas
Métodos probabilísticos	Análisis de confiabilidad	Incorporan incertidumbre en las variables	Requieren caracterización estadística adecuada
Análisis estadístico	Caracterización de corrosión	Permite estudiar distribución y comportamiento de defectos	Depende de la calidad de los datos de inspección
Redes neuronales	Predicción de falla o vida útil	Permiten procesar relaciones complejas entre variables	Requieren datos suficientes para entrenamiento
Aprendizaje automático	Detección y predicción	Facilita clasificación o estimación a partir de datos	La capacidad predictiva depende del conjunto de datos
Métodos híbridos	Evaluación integral	Integran simulación, datos e inteligencia artificial	Incrementan la complejidad del procedimiento

Nota. Comparación de los enfoques metodológicos identificados en los artículos seleccionados.

La Tabla 2 evidencia diferencias entre las metodologías según el propósito de evaluación. Los elementos finitos se orientan al comportamiento mecánico de los componentes, mientras los métodos probabilísticos se concentran en la incertidumbre asociada con la condición estructural. Las técnicas estadísticas permiten caracterizar defectos observados durante inspecciones, mientras las redes neuronales o algoritmos de aprendizaje automático se utilizan para desarrollar predicciones a partir de datos disponibles. Los métodos híbridos reúnen dos o más de estos enfoques para ampliar la información obtenida.

DISCUSIÓN

Los hallazgos muestran que la corrosión constituye el principal mecanismo de deterioro abordado por los 15 artículos seleccionados. Esta concentración puede relacionarse con la influencia de la pérdida de material sobre la capacidad resistente de las tuberías. La profundidad, extensión, geometría o interacción de los defectos modifican la distribución de esfuerzos, razón por la cual aparecen incorporadas dentro de modelos destinados a estimar presión de falla o confiabilidad.

Existe coincidencia entre Velázquez et al. (2022), Cabral et al. (2022) y Torres et al. (2024) respecto al valor de los elementos finitos para estudiar tuberías corroídas. Las diferencias aparecen en la representación del daño o en los procedimientos utilizados para contrastar los resultados. Cabral et al. (2022) conceden atención al perfil geométrico de la corrosión, mientras Torres et al. (2024) incorporan la comparación con modelos semiempíricos. Estos enfoques muestran que la representación del defecto constituye un componente central dentro de la evaluación estructural.

Los estudios de Motta et al. (2024) y Mensah y Sriramula (2024) incorporan la incertidumbre dentro del análisis estructural. Esta perspectiva resulta relevante porque las dimensiones del daño, resistencia del material o cargas de operación pueden presentar variaciones. Una evaluación sustentada únicamente en valores determinísticos ofrece una estimación específica, mientras el análisis probabilístico aporta información relacionada con confiabilidad o posibilidad de falla.

Otro hallazgo corresponde al crecimiento de procedimientos apoyados en inteligencia artificial. Lo y Karuppanan (2022), Kumar et al. (2022), Alobaidi et al. (2022), Mensah y Sriramula (2023), Marques y Willmersdorf (2024), además de Shaik et al. (2024), incorporan redes neuronales o aprendizaje automático dentro de sus propuestas. La presencia de estas herramientas indica una ampliación de las metodologías tradicionales hacia sistemas capaces de procesar datos procedentes de simulaciones, inspecciones o registros operacionales.

La comparación de los artículos permite identificar una orientación hacia métodos híbridos de evaluación. La combinación de elementos finitos con redes neuronales aparece como una alternativa para utilizar la capacidad explicativa de los modelos estructurales junto con

procedimientos predictivos basados en datos. La integración entre análisis probabilístico y elementos finitos sigue una lógica semejante, aunque dirigida hacia la estimación de confiabilidad.

Una limitación identificada en la literatura corresponde a la concentración de estudios sobre tuberías, mientras otras infraestructuras civiles vinculadas con petróleo y gas reciben menor presencia dentro de la muestra. Plataformas, cimentaciones, tanques de almacenamiento, soportes estructurales o instalaciones portuarias requieren evaluaciones de integridad, pero aparecen con menor frecuencia en los artículos seleccionados. Esta diferencia constituye una oportunidad para ampliar futuras revisiones hacia otros componentes del sistema petrolero.

La novedad científica identificada se relaciona con la transición desde métodos aislados hacia esquemas que integran simulación estructural, caracterización de defectos, incertidumbre e inteligencia artificial. Los artículos seleccionados muestran que la evaluación de integridad puede beneficiarse de información procedente de varias fuentes para apoyar decisiones relacionadas con inspección, mantenimiento, reparación o continuidad de servicio. La aplicación práctica de estos enfoques requiere seleccionar la metodología según el tipo de infraestructura, mecanismo de deterioro, información disponible y nivel de precisión requerido.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática permitió identificar que la evaluación de la integridad estructural en infraestructuras vinculadas con la industria del petróleo y gas se concentra en metodologías orientadas al análisis de corrosión, presión de falla, resistencia residual, confiabilidad y vida útil. Los 15 artículos seleccionados muestran una presencia destacada del método de elementos finitos, acompañado por modelos semiempíricos, análisis probabilísticos, técnicas estadísticas, redes neuronales y aprendizaje automático. Esta variedad confirma que la selección del procedimiento depende del tipo de deterioro, las características de la infraestructura y la información disponible para efectuar la evaluación.

El método de elementos finitos constituye uno de los enfoques con mayor aplicación para estudiar tuberías afectadas por corrosión, debido a su capacidad para representar la geometría de los defectos, las propiedades del material y las condiciones de carga. Los estudios revisados muestran que su combinación con modelos semiempíricos o perfiles reales de corrosión aporta información para estimar la presión de falla y valorar la capacidad resistente de los componentes. La calidad de los datos utilizados para construir el modelo mantiene una influencia directa sobre la utilidad de las estimaciones obtenidas.

Los métodos probabilísticos amplían la evaluación estructural mediante la incorporación de incertidumbres asociadas con dimensiones de los defectos, propiedades mecánicas o condiciones operativas. Esta perspectiva permite expresar la condición de una tubería mediante criterios de confiabilidad y probabilidad de falla, lo que aporta información para establecer

prioridades de inspección, mantenimiento o reparación. El análisis estadístico de datos procedentes de inspecciones complementa este enfoque al proporcionar información sobre la distribución y características del deterioro observado.

La inteligencia artificial presenta una participación creciente dentro de las metodologías identificadas. Las redes neuronales y los algoritmos de aprendizaje automático se emplean para estimar presión de falla, detectar anomalías o predecir vida útil. La integración de estas herramientas con elementos finitos representa una de las principales líneas observadas en la literatura analizada, debido a la posibilidad de utilizar información numérica para construir modelos predictivos. La disponibilidad de datos suficientes, su calidad y la validación de las predicciones constituyen aspectos necesarios para su aplicación en escenarios operativos.

La evidencia examinada muestra una orientación hacia metodologías híbridas, donde la simulación estructural puede integrarse con análisis probabilístico, información de inspección o inteligencia artificial. Esta tendencia ofrece posibilidades para obtener una valoración más amplia de la condición de las infraestructuras, aunque la revisión revela una concentración marcada en tuberías afectadas por corrosión. Existe menor presencia de estudios dirigidos a plataformas, cimentaciones, tanques de almacenamiento, soportes u otros componentes civiles del sector, lo que representa un campo de interés para futuros trabajos.

En síntesis, la evaluación de la integridad estructural requiere seleccionar metodologías acordes con el mecanismo de deterioro, nivel de incertidumbre, disponibilidad de datos y características del componente estudiado. La integración entre inspección, modelación numérica, confiabilidad e inteligencia artificial constituye una línea con aplicación relevante para fortalecer la gestión de integridad, orientar intervenciones y reducir el riesgo de fallas en infraestructuras destinadas a la industria del petróleo y gas.

REFERENCIAS

- Alobaidi, M., Meguid, M. A., & Zayed, T. (2022). *Semi-supervised learning framework for oil and gas pipeline failure detection*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35962052/>
- Bhushan, V., & Tewari, S. (2023). *Un estudio exhaustivo de las técnicas utilizadas para el monitoreo de la salud estructural de oleoductos y gasoductos*. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14759217231183715>
- Cabral, R., Ferreira, A., & Pimentel, J. (2022). *Evaluación mediante modelado de elementos finitos de tuberías con defectos de corrosión basado en el modelo de perfil del lecho del río*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622003741>
- Cui, J., Wu, Y., Zhongqi, & Xiao, W. (2023). *Studying Corrosion Failure Prediction Models and Methods for Submarine Oil and Gas Transport Pipelines*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12713>
- Estrella, J. P. (2023). *Diseño metodológico para la evaluación de daños por corrosión interna en tuberías de agua potable*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58355?locale=es>
- Khan, F., Yarveisy, R., & Abbassi, R. (2021). *Análisis de datos de inspección de oleoductos en todo el país y prueba de modelos de degradación probabilísticos*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143321000548>
- Kumar, S. D., Lo, M., & Karuppanan, S. (2022). *Ecuaciones empíricas para la predicción de la presión de falla en tuberías con defectos de corrosión longitudinales interactivos basadas en redes neuronales artificiales*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/6/764>
- Lana, F., Zhoua, T., & Sunc, B. (2024). *External Corrosion Assessment of Oil and Gas Pipelines using 1D Convolutional Neural Network*. Obtenido de <https://www.iapsam.org/PSAM17/program/Papers/PSAM17%26ASRAM2024-1007.pdf>
- Lo, M., & Karuppanany, S. (2022). *Ecuación de evaluación basada en redes neuronales artificiales y análisis de elementos finitos para una tubería corroída con un único defecto de corrosión*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/4/476>
- Marques, A. D., & Willmersdorf, R. B. (2024). *Evaluación de tuberías corroídas mediante redes neuronales, el método de elementos finitos y transformadas wavelet discretas*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/382342189_Corroded_pipeline_assessment_using_neural_networks_the_Finite_Element_Method_and_discrete_wavelet_transforms
- Mensah, A., & Sriramula, S. (2023). *Estimation of burst pressure of pipelines with interacting corrosion clusters based on machine learning models*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423023002061>

- Mensah, A., & Sriramula, S. (2024). *Fiabilidad probabilística basada en elementos finitos de tuberías corroídas con defectos de cúmulos de corrosión interactivos*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030801612300203X>
- Motta, R. d., Ferreira, A. D., & Afonso, S. (2024). *Evaluación probabilística de la corrosión compleja en tuberías considerando la información del perfil del lecho del río*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630724008471?via%3Dihub>
- Shaik, N. B., Jongkittinarukorn, K., & Benjapolakul, W. (2024). *A novel neural network-based framework to estimate oil and gas pipelines life with missing input parameters*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38402261/>
- Torres, J. C., Motta, R., Afonso, S., & Bouchonneau, N. (2024). *Evaluación de la presión de falla de tuberías corroídas mediante análisis semiempírico y de elementos finitos*. . Obtenido de <https://asmedigitalcollection.asme.org/pressurevesseltech/article-abstract/146/2/021503/1197006/Failure-Pressure-Evaluation-of-Corroded-Pipeline?redirectedFrom=fulltext>
- Velázquez, J., Arévalo, G., Díaz, & Cervantes, H. (2022). *Failure pressure estimation for an aged and corroded oil and gas pipeline: A finite element study*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510022001226?via%3Dihub>
- Velázquez, J., Valor, A., & Caleyó, F. (2024). *Estudio estadístico de defectos de corrosión interna localizada en oleoductos y gasoductos mediante inspección por muestreo*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582024003732?via%3Dihub>
- Zhang, P., Liu, W., Liu, S., Xu, T., & Li, Y. (2023). *Análisis de seguridad y evaluación del estado de oleoductos corroídos tras desastres por deslizamientos de tierra*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12880>
- Zhu, X. (2023). *Recent Advances in Corrosion Assessment Models for Buried Transmission Pipelines*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2673-4109/4/2/23>