

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SALUD DE ACTIVOS EN TANQUES DE ACERO AL CARBONO MEDIANTE MODELOS DE ANALÍTICA DE DATOS.

spinTwo

1000 Main Street, Suite 2300 PMP1053.

Email: eduardo@spintwo.com – antonio@spintwo.com

Houston, TX 77002 – Estados Unidos

RESUMEN

La determinación de la salud de activos en equipos estáticos, como los tanques de acero al carbono, representa un desafío técnico debido a la diversidad de mecanismos de daño, la heterogeneidad en la calidad de la información disponible y la naturaleza mixta de los datos obtenidos durante las inspecciones. En la práctica, las metodologías tradicionales de evaluación de condición suelen producir resultados estáticos y discretos basados únicamente en las últimas inspecciones realizadas, sin considerar la evolución temporal de los mecanismos de degradación ni la incertidumbre asociada a las mediciones.

Este trabajo presenta una metodología para el desarrollo de un modelo analítico de salud de activos en tanques de acero al carbono, que integra información cuantitativa (como mediciones de espesores, tasas de corrosión o resultados de protección catódica) y cualitativa (como observaciones visuales, recomendaciones de inspección o evaluaciones normativas). El enfoque metodológico considera tanto los fundamentos físicos de los mecanismos de daño como la estructura lógica de la información que los describe, permitiendo construir un modelo flexible y adaptable a distintos contextos operativos e industriales.

Dentro de las técnicas analíticas consideradas, se plantea el uso de Bayesian Belief Networks (BBN) como herramienta para representar las dependencias causales entre variables, calcular probabilidades de falla bajo condiciones de incertidumbre y actualizar dinámicamente la estimación de salud conforme se incorporan nuevos datos. Esta aproximación permitirá desarrollar un modelo capaz de proyectar el estado actual y futuro del activo, evaluar la efectividad de las inspecciones y priorizar intervenciones con base en el riesgo.

La metodología presentada constituye una guía conceptual y técnica para el diseño de modelos de salud de activos basados en analítica de datos, con potencial de aplicación en diversos sectores industriales.

ABSTRACT

Determining the asset health of static equipment, such as carbon steel storage tanks, represents a technical challenge due to the diversity of damage mechanisms, the heterogeneity in the quality of available information, and the mixed nature of the data obtained during inspections. In practice, traditional condition assessment methodologies tend to produce static and discrete results based solely on the most recent inspections, without considering the temporal evolution of degradation mechanisms or the uncertainty associated with measurements.

This paper presents a methodology for developing an analytical asset health model for carbon steel tanks that integrates quantitative information (such as thickness measurements, corrosion rates, and cathodic protection results) with qualitative information (such as visual observations, inspection recommendations, and regulatory assessments). The methodological approach considers both the physical fundamentals of damage mechanisms and the logical structure of the information describing

them, enabling the construction of a flexible model adaptable to different operational and industrial contexts.

Among the analytical techniques considered, the use of Bayesian Belief Networks (BBNs) is proposed as a tool to represent causal dependencies between variables, calculate failure probabilities under conditions of uncertainty, and dynamically update the asset health estimation as new data become available. This approach enables the development of a model capable of projecting the current and future condition of the asset, assessing inspection effectiveness, and prioritizing interventions based on risk.

The methodology presented constitutes a conceptual and technical guideline for the design of data-driven asset health models, with potential applications across a wide range of industrial sectors.

I. Introducción: contexto y motivación

Los tanques de acero al carbono desempeñan un rol fundamental en sistemas de almacenamiento y operación en múltiples industrias. Su falla puede derivar en eventos de alto impacto asociados a seguridad de las personas, afectación ambiental, interrupción del servicio y sanciones regulatorias. Debido a su criticidad, estos activos suelen estar sujetos a estrictos programas de inspección y evaluación de integridad.

Sin embargo, el enfoque predominante de gestión se basa en evaluaciones periódicas que ofrecen una visión puntual del estado del activo, sin capturar de forma explícita la evolución temporal de los mecanismos de degradación. La creciente disponibilidad de datos operativos e históricos abre la posibilidad de complementar estos enfoques mediante analítica de datos, permitiendo una evaluación más objetiva y dinámica de la salud del activo.

II. Limitaciones del enfoque tradicional de integridad

La gestión convencional de la integridad de tanques se apoya principalmente en inspecciones visuales, mediciones de espesores y criterios normativos aplicados de forma discreta. Si bien estas prácticas son necesarias, su aplicación aislada presenta limitaciones relevantes: 1) Representan una “fotografía” del estado del activo en un momento específico. 2) Dificultan la integración sistemática de históricos de inspección y variables operativas; 3) Favorecen enfoques reactivos, donde los

hallazgos se identifican cuando la degradación ya se ha materializado.

Estas limitaciones reducen la capacidad predictiva y dificultan la priorización eficiente de inspecciones e intervenciones.

III. Concepto de salud del activo en equipos estáticos

La salud del activo no debe entenderse como una condición binaria de “apto” o “no apto”, sino como un estado dinámico que evoluciona a lo largo del tiempo. En equipos estáticos, este estado está influenciado por la condición física del material, las condiciones de operación, los mecanismos de daño activos y el entorno ambiental.

Desde esta perspectiva, la determinación de la salud del activo requiere métricas continuas, comparables y actualizables, capaces de reflejar tanto la condición actual como la tendencia de degradación.

IV. Datos disponibles en tanques de acero al carbono

La evaluación de la salud de tanques se apoya en múltiples fuentes de información, entre las que se incluyen históricos de inspección, mediciones de espesores, tasas de corrosión, registros de protección catódica, variables operativas como presión y temperatura, y factores ambientales.

En la práctica, estos datos suelen presentar características que complican su uso analítico: baja frecuencia de medición, heterogeneidad en formatos, calidad variable y vacíos de

información. Adicionalmente, los equipos estáticos presentan mecanismos de degradación lenta, lo que implica que, para un tanque individual, la cantidad de datos disponibles a lo largo de su vida útil es limitada.

V. Analítica de datos como habilitador en la gestión de integridad

La analítica de datos permite transformar información dispersa en conocimiento estructurado. A través de procesos de integración, depuración y análisis exploratorio, como se observa en la **Figura 1**, es posible identificar tendencias, patrones de degradación y relaciones entre variables que no son evidentes mediante análisis tradicionales.

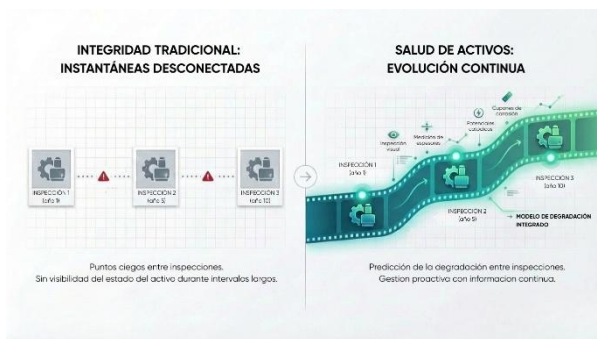


Fig 1 Analítica de datos como habilitador en la gestión de la integridad

Es importante resaltar que los datos, por sí solos, no generan valor operativo. La analítica constituye el habilitador que permite convertirlos en insumos confiables para la toma de decisiones técnicas.

VI. Uso de modelos de analítica avanzada para la evaluación de la salud del activo

Los modelos de analítica avanzada, incluyendo técnicas de Machine Learning (ML) y modelos probabilísticos, ofrecen un marco adecuado para abordar la incertidumbre inherente a la evaluación de equipos estáticos. Estos modelos permiten estimar tasas de degradación, identificar comportamientos anómalos y

clasificar estados de salud del activo a partir de históricos reales.

Dado que los tanques presentan una degradación lenta y un número reducido de inspecciones, el desarrollo de modelos robustos requiere trascender el análisis de un activo individual. Como se observa en la **Figura 2**, en este contexto, resulta fundamental el uso de bases de datos consolidadas de inspecciones provenientes de tanques en entornos y condiciones operativas similares. Asimismo, el uso controlado de datos sintéticos puede complementar la información real, permitiendo entrenar modelos capaces de capturar comportamientos esperados de degradación.



Fig 2. Estrategia de obtención de datos para la creación del modelo.

Sobre esta base de datos consolidados, es posible estructurar diferentes enfoques de modelado analítico para representar el comportamiento de degradación del activo.

Desde el punto de vista analítico, la evaluación de la salud del activo puede abordarse mediante diferentes enfoques de modelado, que van desde modelos basados en tendencias históricas de pérdida de espesor, hasta modelos probabilísticos que representan estados discretos de condición y su transición en el tiempo. En particular, los modelos supervisados permiten identificar patrones de degradación a partir de datos históricos etiquetados, mientras que los enfoques probabilísticos facilitan la incorporación explícita de incertidumbre y conocimiento

experto, aspecto crítico en activos estáticos con información limitada y dispersa.

En este contexto, las Bayesian Belief Networks (BBN) resultan especialmente adecuadas para la evaluación de la salud de tanques de acero al carbono, dado que permiten representar relaciones causales entre variables técnicas, operativas y ambientales, aun cuando la información disponible sea incompleta o heterogénea. A diferencia de modelos puramente determinísticos, las BBN posibilitan combinar datos históricos con juicio experto, actualizar probabilidades conforme se incorporan nuevas evidencias y gestionar la incertidumbre epistemológica inherente a los procesos de degradación lenta, sin requerir grandes volúmenes de datos específicos por activo.

La selección del enfoque de modelado analítico más adecuado depende directamente del nivel de madurez de los datos disponibles, la criticidad del activo y los objetivos de la evaluación. En escenarios con históricos extensos y mediciones frecuentes, los modelos basados en tendencias y regresión pueden ser suficientes para estimar tasas de degradación. Sin embargo, en el caso de tanques de acero al carbono, donde la degradación es lenta y las inspecciones son poco frecuentes, los modelos probabilísticos y los enfoques híbridos resultan más apropiados, al permitir integrar información proveniente de activos similares, conocimiento experto y supuestos físicos del fenómeno de daño. Este criterio de selección evita la aplicación indiscriminada de técnicas de Machine Learning y favorece modelos analíticos técnicamente consistentes, interpretables y alineados con las necesidades de la gestión de activos y los entornos regulados.

Este enfoque no busca sustituir la ingeniería ni las inspecciones, sino complementarlas y potenciar su alcance mediante herramientas

analíticas que integren información dispersa y la proyecten en el tiempo.

VII. Determinación del índice de salud del activo

Como se observa en la **Figura 3**, la metodología propuesta integra múltiples variables técnicas, operativas y ambientales en un índice de salud del activo. Este indicador representa de forma sintética la condición actual del tanque, su tendencia de degradación y su proximidad a estados críticos de pérdida de integridad.



Fig 3. Integración de datos para obtener el índice de salud de activos.

Desde el punto de vista metodológico, el índice de salud del activo se construye a partir de una estructura lógica multicapa que integra variables asociadas a la condición física del tanque (por ejemplo, pérdida de espesor y mecanismos de daño activos), variables operativas (como condiciones de servicio y desviaciones de operación) y factores ambientales o de exposición. Estas variables pueden ser normalizadas y ponderadas de forma relativa, permitiendo representar de manera coherente el impacto combinado de diferentes fuentes de degradación sobre el estado global del activo, sin depender de una única medición o criterio normativo.

Un aspecto clave del índice de salud es su comportamiento dinámico en el tiempo. A medida que se incorporan nuevos datos provenientes de inspecciones, monitoreo de condición u operación, el índice se actualiza reflejando cambios en la condición del activo y ajustando la estimación de su tendencia de

degradación. Esta capacidad de actualización continua permite evaluar la sensibilidad del estado de salud frente a nueva información, identificar desviaciones tempranas respecto a comportamientos esperados y soportar decisiones técnicas basadas no solo en el estado actual, sino también en la evolución proyectada del activo.

La interpretación del índice de salud del activo requiere un análisis cuidadoso de su valor absoluto y de su tendencia temporal. Variaciones incrementales del índice no siempre corresponden a un deterioro físico real del tanque, sino que pueden reflejar la incorporación de nueva información, la reducción de incertidumbre o ajustes en la estimación del estado de condición. Por esta razón, el índice debe analizarse en conjunto con su evolución histórica y con los supuestos del modelo que lo sustenta, evitando decisiones basadas en lecturas aisladas. Esta interpretación integral permite distinguir entre cambios atribuibles a procesos de degradación activos y aquellos derivados de la mejora en la calidad de la información, fortaleciendo la objetividad y trazabilidad de las decisiones técnicas.

El índice de salud permite comparar activos similares, priorizar intervenciones y evaluar la efectividad de las estrategias de inspección y mantenimiento. Su carácter dinámico facilita el seguimiento de la evolución del activo conforme se incorporan nuevos datos, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones.

VIII. Flujo metodológico propuesto: hoja de ruta para la implementación

El flujo metodológico se estructura de forma secuencial y reproducible, facilitando su adopción en organizaciones con distintos niveles de madurez analítica:

1. Recolección de datos históricos y operativos provenientes de inspecciones, operación y entorno.

2. Preparación, validación y depuración de datos, asegurando consistencia y trazabilidad.
3. Consolidación de bases de datos de activos similares y, cuando sea necesario, generación de datos sintéticos para complementar la información disponible.
4. Entrenamiento de modelos analíticos y probabilísticos.
5. Estimación del estado de salud del activo mediante el índice propuesto.
6. Actualización periódica del modelo con nueva información.
7. Visualización de resultados y soporte estructurado a la toma de decisiones.

Más allá de la secuencia de actividades, el flujo metodológico propuesto implica la toma de decisiones técnicas críticas en cada una de sus etapas. Durante la preparación y depuración de datos, se definen criterios de calidad, consistencia y trazabilidad que condicionan la confiabilidad del modelo. En la etapa de selección y entrenamiento de modelos, se evalúa el balance entre complejidad analítica e interpretabilidad, aspecto fundamental para su adopción en entornos industriales. Finalmente, en la fase de actualización, se establecen reglas para la incorporación de nueva información sin introducir sesgos o sobreajustes en la estimación del estado de salud.

El flujo metodológico considera de manera explícita la gestión de la incertidumbre asociada a la baja frecuencia de inspecciones, la variabilidad en las mediciones y la escasez de datos por activo individual. En lugar de intentar eliminar esta incertidumbre, el enfoque la incorpora dentro del modelo analítico, permitiendo representar rangos de condición, probabilidades relativas y escenarios de degradación. Esta aproximación resulta especialmente relevante en entornos regulados, donde la transparencia y trazabilidad de las decisiones técnicas es tan importante como la precisión del resultado.

La implementación efectiva del flujo metodológico propuesto requiere una

gobernanza clara y la participación coordinada de diferentes roles organizacionales. Las áreas de ingeniería e integridad aportan el conocimiento técnico del activo y los mecanismos de daño, mientras que los equipos de inspección y operación garantizan la calidad y trazabilidad de la información de campo. De forma complementaria, los equipos de analítica y tecnología habilitan la infraestructura, el procesamiento de datos y la actualización de los modelos. Esta articulación multidisciplinaria es fundamental para evitar que la iniciativa se limite a un ejercicio aislado de análisis de datos y asegurar que el modelo de salud del activo se integre de manera sostenible a los procesos de gestión de activos de la organización.

Este flujo metodológico facilita su integración natural con los procesos de gestión de activos, permitiendo que los resultados analíticos se traduzcan en decisiones operativas y estratégicas

IX. Integración con la gestión de activos

El índice de salud del activo se integra con los procesos de gestión de activos, alimentando la planificación de inspecciones, la definición de estrategias de mantenimiento y la priorización de inversiones. De esta forma, se facilita la transición desde enfoques basados en calendario hacia estrategias basadas en condición, alineadas con los principios de la norma ISO 55000.

X. Beneficios del enfoque propuesto

La aplicación de esta metodología permite una mayor anticipación de fallas, reducción de riesgos operativos y de seguridad, y optimización de los costos asociados a inspección y mantenimiento. Asimismo, mejora la objetividad, coherencia y trazabilidad de las decisiones técnicas.

XI. Retos técnicos y organizacionales

Entre los principales retos técnicos se encuentran la calidad y disponibilidad de los datos, la baja frecuencia de inspecciones y la necesidad de integrar información de múltiples

activos. A nivel organizacional, los desafíos se relacionan con la adopción de enfoques basados en datos, la confianza en los modelos analíticos y la alineación con prácticas tradicionales de inspección y evaluación.

XII. Valor del enfoque en entornos regulados

La metodología propuesta es trazable, auditable y repetible, lo que facilita su aplicación en entornos regulados. Proporciona soporte técnico para decisiones justificadas y complementa los procesos normativos tradicionales de evaluación de integridad.

XIII. Conclusiones

La salud de los activos puede ser evaluada de manera objetiva mediante modelos de analítica de datos. El enfoque propuesto permite evolucionar desde evaluaciones estáticas hacia un monitoreo dinámico, mejorando la seguridad, la confiabilidad y la eficiencia en la gestión de tanques de acero al carbono.

XIV. Próximos pasos

Para siguientes etapas se propone la aplicación piloto de la metodología en tanques representativos, el refinamiento progresivo de los modelos con nueva información y su integración con sistemas de gestión de activos. A mediano plazo, el enfoque puede evolucionar hacia capacidades predictivas y prescriptivas más avanzadas.

XV. Referencias Bibliográficas

- [1] International Organization for Standardization. (2024). ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements. ISO.
- [2] Institute of Asset Management. (2015). Información del activo, estrategia, normas y gestión de datos. IAM.
- [3] International Organization for Standardization. (2018). Condition monitoring

and diagnostics of machines — General guidelines (ISO 17359:2018). ISO.

[4] Russell, S. J., & Norvig, P. (2009). Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.). Prentice Hall.

[5] Booz Allen Hamilton. (2015). The Field Guide to Data Science (2nd ed.). Booz Allen Hamilton Inc

[6] American Petroleum Institute. (2020). API Std 653: Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction (5th ed., incl. Addenda 1–4 and Errata 1–2). American Petroleum Institute.

[7] Institute of Asset Management. (2016). Ingeniería de confiabilidad (Specific Subject

Guideline, versión 1.1, traducción al español). The Institute of Asset Management.

[8] Institute of Asset Management. (2016). Toma de decisiones en la inversión de capital, operación y mantenimiento (Specific Subject Guideline, traducción al español). The Institute of Asset Management.

[9] Institute of Asset Management. (2016). Ingeniería de sistemas (Specific Subject Guideline SSG 13, traducción al español). The Institute of Asset Management.

Eduardo Luiggi

Cofundador y Data Scientist en spinTwo, una empresa especializada en soluciones de computación de alto desempeño (HPC), inteligencia artificial y analítica de datos enfocada en transformar información compleja en conocimiento aplicable a problemas reales de negocio e ingeniería. Doctor en Física en el área de Altas Energías y Partículas Elementales y líder en el desarrollo de metodologías analíticas avanzadas que integran técnicas estadísticas, de Machine Learning y modelos probabilísticos para abordar retos de datos heterogéneos y de alta complejidad, ofreciendo soluciones que permiten a las organizaciones obtener insights accionables y soportar decisiones basadas en evidencia científica.

Con una trayectoria profesional marcada por la aplicación de métodos cuantitativos y análisis estadístico profundo, ha desarrollado proyectos de ciencia de datos e inteligencia artificial en distintos contextos, combinando bases académicas sólidas con experiencia práctica en la creación de modelos analíticos robustos. Su enfoque integra métodos bayesianos y frecuentistas para estimar patrones de comportamiento, gestionar incertidumbre y extraer valor de conjuntos de datos con calidad variable.

La experiencia se extiende al diseño de soluciones escalables de analítica y computación científica, colaborando con equipos multidisciplinarios para abordar desafíos de datos en industrias que requieren alto rigor técnico y predictivo. Su trabajo fortalece la capacidad de las organizaciones para estructurar datos de forma coherente, habilitar modelos inteligentes y potenciar iniciativas de transformación digital basadas en datos.

Antonio José Márquez Florián

Ingeniero Mecánico, Máster en Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo, especialista en Electrónica Industrial y Gestión de Activos, con más de 20 años de experiencia en mantenimiento, confiabilidad, integridad de activos y seguridad de procesos en sectores como Oil & Gas, energía, petroquímica, manufactura y transporte de hidrocarburos.

Ha liderado y acompañado la implementación de Sistemas de Gestión de Activos bajo ISO 55001, integrando de forma práctica la ingeniería de mantenimiento, la gestión del riesgo y la seguridad de procesos, con resultados verificables en disponibilidad, control de riesgos operacionales y generación

de valor sostenible. Su experiencia incluye la estructuración e integración de modelos de gestión de activos, confiabilidad y seguridad de procesos en entornos industriales de alta criticidad.

Cuenta con amplia experiencia como consultor senior y formador, habiendo diseñado e impartido programas especializados en Gestión de Activos, Confiabilidad, RCM, LCC, RAM, Análisis de Criticidad, RCA, PMO y Seguridad de Procesos, tanto en contextos académicos como corporativos, para organizaciones públicas y privadas en Colombia y Latinoamérica. Es docente catedrático de posgrado en programas de especialización en Gestión de Activos y ha participado activamente en procesos de formación técnica y ejecutiva.

Está certificado como CMRP (SMRP) y CCPSC (AICHE/CCPS), y posee sólida experiencia en la aplicación de normas y estándares internacionales (ISO 55000, ISO 31000, ISO 14224, IEC 61511, API, NFPA, OSHA, entre otros). Complementa su perfil con el uso de analítica de datos, Machine Learning e Inteligencia Artificial como herramientas para fortalecer la toma de decisiones en la gestión de activos y la gestión del riesgo.

Como ponente, sus áreas de interés incluyen la Gestión de Activos basada en Riesgo, la integración de la Seguridad de Procesos en los sistemas de gestión, la transformación digital de la gestión de activos, y el desarrollo de modelos analíticos avanzados para mejorar la resiliencia operativa y la sostenibilidad organizacional. Ha participado como ponente en congresos internacionales y mundiales, compartiendo experiencias prácticas, marcos metodológicos y resultados aplicables a entornos industriales reales.

Nombre de Autor: Eduardo Luiggi
Teléfono Oficina: +1 (346)-327-7867
Dirección del autor: 1000 Main Street, Suite
2300 PMP1053
E-mail: eduardo@spintwo.com
Ciudad: Houston, TX 77002
País: Estados Unidos

Nombre de Autor: Antonio Márquez
Teléfono Celular: (300)-308-5301
Dirección del autor: Cra 23 No.42A-00
E-mail: antonio@spintwo.com
Ciudad: Neiva
País: Colombia