

Un sistema de gestión digital para equipos

Mantenimiento de inventario

ZLSZh0II

Szocz6c

s9ESCIN

EY/6our,

oL:00I

aEI Sz07

000:IESV

S2/9-160

I-SIEE8-6

L6I(aSCI

EY)Hure

aunaua

oIEAos

Pue

SenduoC

SpualEIA

oiuon2al

3 PaouE

APYUEUI

UEUIUEU

Sz07

Xihua Liu

Instituto de Aplicaciones Informáticas
Academia China de Ingeniería Física
Mianyang, China
xenaliuhust@163.com

zhen liu

Instituto de Aplicaciones Informáticas
Academia China de Ingeniería Física
Mianyang, China
liuzhenme@163.com

Ya Dong Zheng

Sichuan Zhongrui Tecnología de la Información Co., Ltd.
Mianyang, China
958502151@163.com

Guiyu Lai*

Instituto de Aplicaciones Informáticas
Academia China de Ingeniería Física
Mianyang, China

*Autor correspondiente: 1105594009@qq.com

Resumen: Para superar las limitaciones persistentes inherentes a los sistemas convencionales de mantenimiento de equipos basados en papel y a las prácticas fragmentadas de gestión de datos, se propone un Sistema Digital de Mantenimiento de Inventario de Equipos. La gobernanza centralizada de datos se logra mediante una arquitectura basada en metamodelos que aplica protocolos estandarizados de adquisición de datos y procedimientos de validación automatizados. Este sistema establece un marco integrado para la gestión integral del ciclo de vida de los datos, incorporando canales automatizados de Extracción-Transformación-Carga (ETL) con mecanismos de mapeo de esquemas para armonizar los flujos de datos de múltiples fuentes. La interoperabilidad entre plataformas se habilita mediante la representación de gemelos digitales basada en WebGL, que facilita la visualización tridimensional interactiva de los inventarios de equipos. Un diseño modular de tres capas, que comprende Adquisición de Datos, Procesamiento y Análisis, y un Panel de Control de Conocimiento Situacional, aborda la brecha crítica entre los requisitos de mantenimiento industrial y los estándares de la Industria 4.0. La validación mediante casos piloto industriales demuestra mejoras significativas en la eficiencia de la toma de decisiones y la mitigación de errores.

Palabras clave: espacio digital, mantenimiento de inventario de equipos, metadatos, ETL, visualización de datos

I. INTRODUCCIÓN

La gestión eficaz del inventario de equipos es fundamental para las operaciones industriales [1]. Los modelos, datos y documentos generados durante el mantenimiento de los equipos deben gestionarse en un espacio digital unificado [2-4]. Sin embargo, las prácticas actuales, que se basan en sistemas de archivo en papel y la propiedad fragmentada de los datos, presentan ineficiencias críticas. Los flujos de trabajo de mantenimiento requieren una laboriosa recuperación de informes dispersos, seguida de la introducción manual de datos y el procesamiento secundario, un proceso propenso a errores y retrasos. A medida que la cantidad de equipos aumenta exponencialmente, las limitaciones de este enfoque convencional (p. ej., la dependencia del papel y la gobernanza descentralizada de datos) se han acentuado cada vez más, lo que se manifiesta en tres desafíos principales: (1) Organización fragmentada de datos: Los archivos dispersos dificultan la recuperación eficiente, lo que compromete la integridad de los datos y su potencial de reutilización. (2) Capacidades analíticas inadecuadas: La dependencia excesiva de herramientas básicas como Excel restringe el análisis multidimensional, lo que limita la identificación de patrones y la precisión predictiva. (3) Conocimiento situacional limitado: Los datos descentralizados obstaculizan la monitorización integral.

Esto dificulta el desarrollo de modelos de predicción del rendimiento para la gestión proactiva. Para subsanar estas deficiencias, este estudio presenta un Sistema de Gestión Digital para el Mantenimiento de Inventario de Equipos que integra la adquisición, extracción, transformación, carga y análisis de datos, así como paneles interactivos. Al optimizar todo el ciclo de vida de los datos —desde la recopilación automatizada y el almacenamiento centralizado hasta la utilización optimizada mediante algoritmos—, el sistema propuesto mejora la fiabilidad de la evaluación y facilita la optimización del inventario basada en datos. Las implementaciones piloto demuestran una mejora significativa en la eficiencia de la toma de decisiones de mantenimiento, lo que subraya su potencial para la transformación industrial.

II. MÉTODOS

A. Extracción, transformación y carga de datos (ETL)

La integración de datos heterogéneos de múltiples fuentes —que abarcan formatos estructurados, semiestructurados y no estructurados— en un repositorio centralizado es fundamental para lograr la consistencia, la accesibilidad y la trazabilidad de los datos en los sistemas industriales [5]. Esta integración facilita capacidades analíticas mejoradas para el apoyo a la toma de decisiones y la innovación, pero plantea importantes desafíos debido a la complejidad inherente de armonizar esquemas de datos dispares y procesar conjuntos de datos a gran escala. Para abordar estos desafíos, este estudio utiliza un marco impulsado por ETL (Extraer, Transformar, Cargar) que automatiza la limpieza, normalización y agregación de flujos de datos heterogéneos a través de una tubería de tres fases[6]: (1) Extracción de datos: Aprovechamiento de conectores API y herramientas de mapeo de esquemas para ingerir datos de sensores de IoT, bases de datos relacionales y sistemas de almacenamiento en la nube.(2) Transformación de datos: Implementación de algoritmos basados en reglas para la detección de valores atípicos, imputación de valores faltantes y alineación semántica para garantizar la interoperabilidad.(3) Carga de datos: Utilización de arquitecturas de computación distribuida para lograr una carga de alto rendimiento en un lago de datos unificado [7].

Esta técnica consta de dos archivos de script: transformación y trabajo. La transformación gestiona principalmente el procesamiento y la conversión de datos, gestionando la entrada, la conversión, la validación y la salida de datos. El trabajo orquesta todo el flujo de trabajo y, debido a la ejecución paralela de las transformaciones, se requiere una herramienta de programación en serie para gestionarlas. Además, un solo trabajo puede abarcar varios.

Transformaciones, como se ilustra en la Figura 1. Las entradas de trabajo son los componentes fundamentales de un trabajo. Al igual que los pasos de transformación, las entradas de trabajo también se pueden representar visualmente mediante iconos. Sin embargo, existen varias diferencias entre las entradas de trabajo y los pasos de transformación: los pasos de transformación implican un flujo de datos, mientras que las entradas de trabajo implican un flujo de pasos; al iniciarse una transformación, todos los pasos comienzan en paralelo a la espera de la entrada de datos, mientras que las entradas de trabajo siguen estrictamente una secuencia de ejecución. Tras completarse una entrada de trabajo, comienza la siguiente. Los objetos de resultado se pueden transferir entre entradas de trabajo. Estos objetos de resultado contienen filas de datos que no se transmiten como un flujo de datos, sino que esperan a que concluya una entrada de trabajo antes de transferir el control a la siguiente.

B. Tecnología de visualización integrada para modelos gemelos geométricos tridimensionales

Para permitir una implementación optimizada, independiente del navegador y multiplataforma de una visualización digital geométrica 3D liviana, al mismo tiempo que se cumplen los requisitos interactivos esenciales, la representación en tiempo real y las capacidades de animación, este estudio adopta WebGL [8], una API de JavaScript compatible con los estándares OpenGL ES, como motor de representación para escenas 3D.

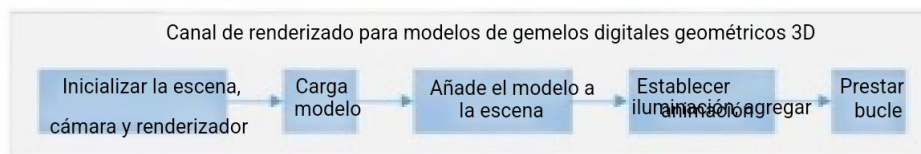


Figura 2. Proceso de renderizado para modelos gemelos digitales geométricos 3D.

WebGL, como implementación de la API de JavaScript basada en el estándar OpenGL ES, permite la renderización de gráficos 3D interactivos dentro del elemento Canvas de navegadores web compatibles sin necesidad de complementos adicionales. Aprovecha la aceleración por hardware a través de la GPU del usuario para lograr un rendimiento de renderizado más fluido y sofisticado.

Para garantizar una amplia aplicabilidad en diversos escenarios, el framework admite múltiples formatos de archivo de modelos 3D comunes, como glb/gltf, OBJ, FBX y STL. Además, la extensibilidad se logra mediante cargadores personalizables, lo que permite una integración fluida con otros formatos de modelos propietarios o emergentes.

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

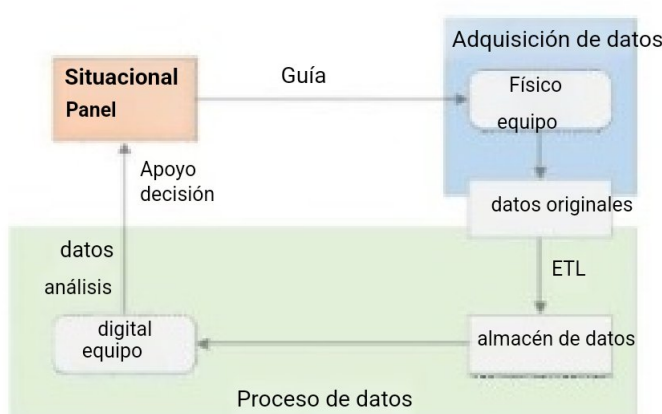


Figura 3. Arquitectura del sistema jerárquico que comprende tres estratos centrales.

[9]. Este enfoque abstrae las dependencias específicas de hardware y sistema operativo de cada plataforma, lo que garantiza una visualización consistente en dispositivos y navegadores heterogéneos. Los usuarios que acceden a la escena 3D desde diferentes ordenadores y sistemas operativos obtienen resultados de renderizado idénticos, eliminando así las discrepancias inducidas por la plataforma. El flujo de renderizado para modelos de gemelos digitales geométricos 3D se muestra en la Figura 2.

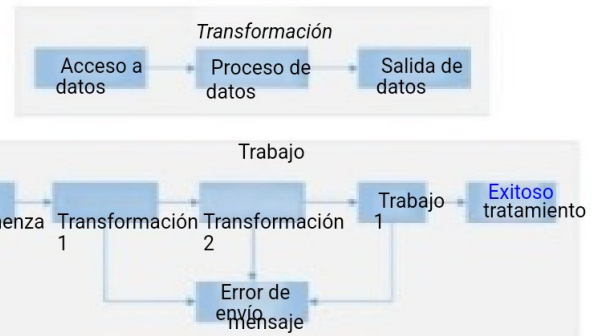


Figura 1. Transformación y empleo.

La arquitectura del sistema de gestión digital comprende tres módulos funcionales principales: Adquisición de Datos, Procesamiento y Análisis de Datos, y Panel de Control Situacional. La Figura 3 presenta la arquitectura jerárquica del sistema, compuesta por tres estratos principales.

A. Adquisición de datos

Para abordar los desafíos de las fuentes de datos descentralizadas y la gobernanza fragmentada, el Módulo de Adquisición de Datos implementa una arquitectura basada en metamodelos con mecanismos de validación automatizados, lo que garantiza la integridad y la estandarización de los datos. El módulo integra tres componentes funcionales:

- Definición de formulario: administra los ciclos de vida del metamodelo (edición, publicación, desuso, eliminación) con control de versiones y registros de auditoría (metadatos de creador/modificador). Admite herencia jerárquica y configura más de 7 tipos de atributos (texto, numérico, booleano, fecha, archivo, enumerado, personalizado) con aplicación de restricciones (singularidad, no nulabilidad, rangos de valores, valores predeterminados, indicadores de mutabilidad).
- Entrada de datos: Permite la entrada manual y la importación por lotes desde Excel, guiada por esquemas de metamodelo, con funciones de deshacer/revertir operaciones recientes. Permite la replicación de datos mediante clonación y la edición/eliminación masiva. La validación automatizada garantiza la compatibilidad de tipos y el cumplimiento de las restricciones para todas las entradas.
- Intercambio de datos: facilita la exportación por lotes de conjuntos de datos multiformularios con programación de tareas y salidas descargables.

Procesa importaciones en formato ZIP a través de flujos de trabajo transaccionales (tareas de creación/eliminación/reversión), lo que garantiza la atomicidad durante las operaciones de datos masivos.

B. Procesamiento de datos

Este módulo aborda los desafíos de la codificación rígida de estructuras de datos dinámicas y la evolución de la lógica de negocio, desvinculando los procesos de gobernanza de datos del código de negocio. Implementa un marco ETL (Extracción-Transformación-Carga) basado en la configuración para reconstruir datos sin procesar en formatos específicos del dominio mediante las siguientes capacidades:

- Ingestión de datos independiente del esquema: permite la conectividad de la base de datos con control de acceso granular (permisos CRUD) para fuentes de datos sin procesar heterogéneas, lo que elimina la dependencia de estructuras de datos predefinidas.
- Transformación dinámica de datos: proporciona más de 10 operaciones de transformación que incluyen mapeo de valores, división de columnas, truncamiento/reemplazo de cadenas, deduplicación, división de campos, clasificación y aplanamiento de filas.
- Orquestación de flujo de trabajo: incorpora componentes de control de flujo para el enrutamiento de datos y la gestión de canalizaciones, con clasificación de datos, filtrado de registros, operaciones nulas, terminación condicional, ejecución de consultas, fusión de datos y uniones de conjuntos de datos.
- Procesamiento analítico: integra algoritmos estadísticos (por ejemplo, muestreo estratificado, estadísticas descriptivas) para la creación de perfiles de datos en tiempo real y el análisis de tendencias.
- Carga de datos adaptable: automatiza la carga de datos conscientes del esquema en esquemas de bases de datos específicos del tema mediante transacciones compatibles con ACID.

La arquitectura emplea un diseñador de flujo de trabajo gráfico para la configuración visual de la canalización ETL, lo que permite:

- Adaptabilidad sin código: Implementación rápida de nuevos trabajos ETL a través de plantillas parametrizadas sin modificar la lógica empresarial central
- Gobernanza controlada por versiones: reglas de transformación de datos aisladas para adaptarse a los requisitos comerciales en constante evolución

C. Panel de situación

El módulo implementa un marco de visualización multidimensional que integra los siguientes componentes:

- Monitoreo del estado del sistema: visualización en tiempo real del estado operativo del equipo, métricas de rendimiento del subsistema y registros históricos a nivel de componentes a través de un tablero digital interactivo.
- Representación de datos heterogéneos: incorpora mapeo de distribución geoespacial, análisis de valores numéricos, visualización de formas dinámicas y predicción de tendencias de series de tiempo.
- La integración del modelo de predicción de gemelos digitales basado en FMU: las especificaciones estructurales de entrada/salida estandarizadas para los modelos FMU fueron

Se formuló y desarrolló la interfaz modular, incorporando el procesamiento de entrada del modelo, la interpretación de archivos de configuración, la regulación de la ejecución y la gestión de salida. Este enfoque sistemático permite tres funcionalidades críticas: gestión de la configuración en línea de los modelos gemelos digitales de rendimiento, invocación de simulación en tiempo real con optimización de latencia y visualización dinámica de los resultados de la predicción multivariante mediante paneles web.

- El marco de integración para el modelado de gemelos geométricos 3D se desarrolló mediante la implementación sistemática del motor de renderizado de escenas 3D basado en WebGL. Esta metodología permite tres funcionalidades principales: (1) interoperabilidad de modelos 3D entre formatos compatible con los estándares de archivos glb/gltf, obj, fbx y stl mediante algoritmos unificados de análisis de datos; (2) módulos de visualización interactiva que incorporan funciones fundamentales de interacción persona-computadora, como el resaltado de selecciones, la gestión de eventos de clic/doble clic y la manipulación de la ventana gráfica con seis grados de libertad (rotación, zoom y desplazamiento); y (3) canales de renderizado avanzados que implementan renderizado basado en la física (PBR) para el mapeo de materiales y texturas, así como funciones de simulación cinemática para secuencias de desmontaje/montaje de componentes. El sistema integrado alcanza una precisión geométrica submilimétrica, manteniendo velocidades de fotogramas en tiempo real (>60 fps) mediante computación acelerada por GPU.
- El marco interactivo que integra modelos gemelos digitales geométricos 3D con gemelos de predicción de rendimiento basados en FMU funciona a través de cuatro mecanismos principales: (1) establecer asociaciones topológicas entre geometrías de componentes y sus modelos de rendimiento FMU correspondientes utilizando enlace de metadatos basado en XML, (2) implementar detección de selección de objetos en tiempo real a través de algoritmos de lanzamiento de rayos dentro del lienzo de visualización 3D, (3) capturar componentes seleccionados por el usuario a través de una arquitectura impulsada por eventos (EDA) con una latencia inferior a 100 ms, y (4) activar simulación de modo dual a través de eventos de interacción de doble clic que invocan y ejecutan simultáneamente el modelo predictivo asociado.

IV. APLICACIÓN Y DISCUSIÓN

El flujo de trabajo operativo del sistema de gestión de inventario de equipos, como se ilustra en la Figura 4, opera en cinco etapas: definición del esquema, adquisición de datos, agregación de datos, procesamiento de la información y visualización interactiva. Este sistema multiagente involucra a tres actores clave: el recopilador de datos, los diseñadores de esquemas y los supervisores ejecutivos. El flujo de trabajo comienza con los diseñadores de esquemas, quienes establecen las especificaciones del esquema de datos mediante la parametrización estructural de los atributos del inventario, las restricciones de los tipos de datos y las reglas de validación, que posteriormente se distribuyen al recopilador de datos para la carga de datos de campo. Los diseñadores de esquemas verifican y agregan los conjuntos de datos de inventario recopilados antes de procesarlos mediante procesos de extracción, transformación y carga (ETL) alineados con los requisitos operativos. Estos conjuntos de datos refinados se visualizan posteriormente.

a través de paneles dinámicos que sintetizan análisis temáticos de patrones de asignación de activos.

El sistema de gestión de inventario de equipos propuesto demuestra avances significativos en la eficiencia operativa gracias a su flujo de trabajo estructurado en cinco etapas y la asignación de tareas específicas para cada rol. Al implementar la definición de esquemas como fase fundamental, el sistema aborda una deficiencia crítica en los sistemas de inventario tradicionales: la falta de marcos estandarizados de gobernanza de datos. Sin embargo, hay dos limitaciones que merecen consideración. En primer lugar, la dependencia del sistema de esquemas predefinidos puede restringir la adaptabilidad a nuevos tipos de inventario que requieren la adición dinámica de atributos, un desafío observado en almacenes inteligentes con IoT. En segundo lugar, si bien las canalizaciones ETL mejoran la eficiencia del procesamiento, la latencia durante los períodos pico de ingesta de datos requiere una mayor optimización mediante arquitecturas de computación distribuida.

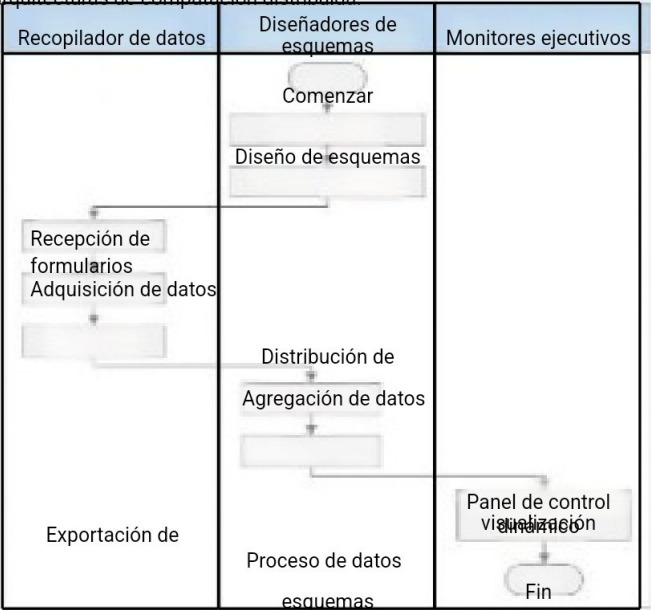


Figura 4. Flujo de trabajo operativo de la gestión del inventario de equipos. sistema

Estos hallazgos sugieren tres prometedoras líneas de investigación: (1) Integración de algoritmos de aprendizaje automático para la evolución automatizada de esquemas, (2) Implementación de nodos de computación en el borde para mejorar las capacidades de procesamiento en tiempo real, y (3) Exploración de mecanismos de verificación de la integridad de datos basados en blockchain para sistemas de inventario de misión crítica. El diseño modular del sistema proporciona una base sólida para dichas extensiones, a la vez que cumple con los estándares de digitalización industrial en constante evolución.

V. CONCLUSIÓN

Para abordar los desafíos operativos en la gestión del inventario de equipos (incluido el procesamiento ineficiente de documentos, la visualización inadecuada del estado del inventario global y la predicción cuantitativa insuficiente del rendimiento del almacenamiento durante las fases de mantenimiento), este estudio desarrolló un sistema de gestión integrado a través de una investigación sistemática.

El marco implementado comprende tres componentes principales: (1) Un módulo de adquisición de datos basado en metadatos que permite la recopilación distribuida de datos y la extensibilidad del esquema a través de definiciones de plantillas paramétricas; (2) Una base de datos de temas de inventario estandarizada que emplea procesos de extracción-transformación-carga (ETL) con motores de reglas comerciales configurables para el procesamiento dinámico de datos; y (3) Un sistema de panel interactivo que implementa gráficos de control de procesos estadísticos para el monitoreo en tiempo real de la distribución del inventario de todo el sistema, el estado del subsistema y las condiciones a nivel de componente.

REFERENCIAS

[1] Rajesh M, Arpitha, Kruthi, et al. Diseño y desarrollo de un equipo de manipulación de materiales ergonómico habilitado para IoT para una gestión eficaz del inventario [C] // Conferencia sobre diseño de productos innovadores y sistemas de fabricación inteligente. Springer, Singapur, 2025. DOI: 10.1007/978-981-97-6732-8_48.

[2] Baker A, Pepe K, Hutchison N, et al. Facilitando la transformación digital de la fuerza laboral: Un marco de competencias de ingeniería digital // Conferencia Internacional de Sistemas IEEE (SysCon) de 2021. IEEE, 2021.

[3] Gómez C. Número especial: Ingeniería de gemelos digitales confiables[J]. Simulación: Revista de la Sociedad para la Simulación por Computadora, 2024(9):100.

[4] Huang J, Gheorghe A, Handley H, et al. Hacia la ingeniería digital: el advenimiento de la ingeniería de sistemas digitales. Revista Internacional de Ingeniería de Sistemas, 2020, 10(3):234-261.

[5] Simitsis A, Vassiliadis P, Sellis T. Optimización de procesos ETL en almacenes de datos[C]// Conferencia internacional sobre ingeniería de datos. IEEE, 2005. DOI:10.1109/ICDE.2005.103.

[6] Dapkute A, Siozinyas V, Jonaitis M, et al. Gestión de datos gemelos digitales: marco y métricas de rendimiento del sistema ETL basado en la nube [J]. Machines, 2024, 12 (2). DOI: 10.3390/machines12020130.

[7] Walha A, Ghozzi F, Gargouri F. Integración de datos desde datos tradicionales a macrodatos: características principales y comparaciones de enfoques ETL[J]. Journal of Supercomputing, 2024, 80(19). DOI:10.1007/s11227-024-06413-1.

[8] Chickerur S, Balanavar S, Hongekar P, et al. WebGL vs. WebGPU: un análisis de rendimiento para Web 3.0 [J]. Procedia Computer Science, 2024, 233: 919-928. DOI: 10.1016/j.procs.2024.03.281.

[9] Wang Z, Yang L. Métodos de optimización del rendimiento para escenas grandes en WebGL[J]. Actas de SPIE, 2023, 12800(000):7. DOI:10.1117/12.3003807.