



ARTÍCULO ORIGINAL
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO Y DE LA PRODUCCIÓN

El camino hacia la implementación del mantenimiento predictivo 4.0 en Cuba

A roadmap for the implementation of predictive maintenance 4.0 in Cuba

Fidel Ernesto Hernández-Montero^{1,*} <https://orcid.org/0000-0002-5003-2807>

Caridad Anías-Calderón¹ <https://orcid.org/0000-0002-5781-6938>

Mario Luis Ruiz-Barrios² <https://orcid.org/0000-0001-7602-8948>

¹Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae. La Habana, Cuba

²Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba

Correo para correspondencia: fhernandez@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

El artículo presenta las posibles bases para el gradual tránsito hacia la implementación del Mantenimiento Predictivo (PDM) 4.0 en Cuba. Se realiza una análisis bibliográfico de los aspectos considerados para su implementación a nivel internacional, tales como: Industria 4.0, *Big data* y algoritmos de análisis de datos. Se proponen pasos para avanzar hacia la implementación del PDM en los países en vías de desarrollo, sobre todo en el contexto cubano. Se estudia el proyecto **Desarrollo de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial** y el estudio piloto (en una central termoeléctrica). Se demostró que el principal factor disponible para la implementación del PDM 4.0 en Cuba es el humano, aunque debe enfocarse más hacia el aprovechamiento de las capacidades nacionales.

Palabras clave: mantenimiento predictivo, Industria 4.0, *Big data*, algoritmos de análisis de datos.

ABSTRACT

The article presents the possible basis for the gradual transition towards the implementation of Predictive Maintenance (PDM) 4.0 in Cuba. Bibliographic analysis of the aspects considered for implementation at the international level, such as Industry 4.0, Big data, and data analysis algorithms. It is proposed steps to advance the implementation of the PDM in developing countries, especially in the Cuban context. The project Development of Monitoring Technology and Industrial Diagnosis and the pilot study (in a thermoelectric plant) are studied. The main factor available for the implementation of PDM 4.0 in Cuba is Human resources, although it must focus more on the use of national capacities.

Keywords: *predictive maintenance, Industry 4.0, Big data, Data analytics.*

Recibido: 5/9/2023

Aprobado: 22/12/2023

Introducción

El mantenimiento predictivo y la gestión de la condición y el pronóstico constituyen enfoques que utilizan el monitoreo de la condición para predecir la condición futura de una maquinaria y efectuar la toma de decisiones basada en dicha predicción. El Mantenimiento Predictivo proporciona capacidad para asegurar calidad del producto, realizar un mantenimiento a tiempo, minimizar las paradas no planificadas y evitar fallos catastróficos. El pronóstico efectivo genera beneficios, por ejemplo, el incremento de la seguridad de los sistemas, de la confiabilidad operacional, de la efectividad del mantenimiento, y la reducción del mantenimiento, la inspección y las fallas inducidas por reparación, así como el costo del ciclo de vida [1,2].

En los sectores de la fabricación tradicionalmente, el monitoreo de la condición y el mantenimiento predictivo, se basan, en lo fundamental, en el factor humano y en la tecnología. De hecho, en muchos casos el registro de datos es realizado a través de inspecciones físicas llevadas a cabo por personal altamente especializado. A esto se suma el hecho de que en la actualidad el uso de los datos registrados está más enfocado a la detección de anomalías en el funcionamiento y el control, y no a la optimización y la predicción, que son los elementos que proporcionan el mayor valor [3,4].

Por ello, en la actualidad los esfuerzos principales se están dirigiendo hacia el desarrollo de soluciones integrales con base en las necesidades del negocio, los modos de fallo y el comportamiento de los equipos, lo cual se logra a través de la aplicación de tecnologías avanzadas de captación, análisis y tratamiento de datos. Se trata de aprovechar las nuevas posibilidades que ofrecen el *big data*, Machine Learning, Minería de Datos, IoT, Condition Monitoring, etc., llevando a una implementación de nuevos modelos de negocio. La automatización e impregnación de inteligencia al monitoreo de la condición de las maquinarias habilitaría el acceso de los especialistas a tareas de mayor valor, relacionadas con la optimización de operaciones. A esta implementación es a lo que se ha dado en llamar Mantenimiento Predictivo 4.0 (PdM 4.0) [5].

Los países en desarrollo tienen gran potencial para aplicar la tecnología IoT, intentando utilizar la mayoría de los datos que esta proporciona. Sin embargo, no resulta sencillo para las empresas industriales de países en desarrollo, sobre todo las PYMES, alinearse a estas nuevas propuestas que implican un cambio de enfoque sustancial respecto al tradicional. En el trabajo que se presenta se pretende describir algunos de los aspectos que deben ser considerados para la implementación del PdM 4.0 y cómo esta cuestión debe ser atendida por parte de los países en desarrollo, específicamente desde nuestro país. Finalmente, se describen algunas acciones que al respecto se han venido realizando en Cuba.

Sobre la implementación del PdM 4.0

La implementación del PdM 4.0, que encuentra ejemplos prácticos notables en grandes industrias de países desarrollados, involucra los aspectos siguientes [6]:

- Técnicos
- De Infraestructura
- Organizativos

Desde el punto de vista Técnico, la implementación del PdM 4.0 requiere identificar los activos a los cuales resulta factible aplicar PdM 4.0 con miras a incrementar su confiabilidad [6]. Solo los activos de criticidad alta y posiblemente media alcanzan a justificar la inversión requerida y solo los activos de los cuales se puede obtener la información requerida pueden considerarse como candidatos. Posteriormente, para obtener un modelo adecuado para la confiabilidad del activo es necesario aplicar análisis de causa raíz y de modos de fallo, para lo cual se debe determinar qué información (datos) se necesita, qué sensores se necesitan, cómo se relacionan las diferentes causas raíz y los modos de fallo, entre otros. Luego se puede seleccionar el algoritmo que se utilizaría para realizar la predicción, lo cual pudiera requerir la participación de especialistas en análisis de información para el desarrollo de algoritmos de autoaprendizaje capaces de encontrar detalles significativos dentro de grandes volúmenes de información. Entonces es que se aplicaría el PdM 4.0, con la estimación en tiempo real del desempeño del activo a través del procesamiento de datos de mantenimientos e históricos de fallos, datos proporcionados por sensores y datos ambientales por parte del algoritmo. En su nivel más alto de madurez, el algoritmo no solo será capaz de predecir cuando exista probabilidad significativa de que ocurra un fallo, sino también de recomendar, dado un conjunto dado de tareas de mantenimiento a realizar, cuál podría ser la acción más efectiva para evitar que ocurra el fallo [7, 8].

En cuanto a Infraestructura, la implementación de PdM 4.0 requiere tecnología *big data* [6]. Al respecto, es necesario tener en cuenta cómo se almacenarán los datos provenientes de fuentes internas y externas, qué combinación de datos en intranet y datos en la nube se requeriría y cómo se implementaría el acceso a esos datos para que no se afecte de manera significativa la velocidad, confiabilidad y ancho de banda de la red de comunicaciones de la entidad. También se requiere de infraestructura de Internet de las Cosas, de modo que los activos estén enlazados de forma inalámbrica con el centro de datos de mantenimiento, el cual estaría registrando y distribuyendo los datos de sensores. Esto involucra la selección del algoritmo adecuado para la conectividad inalámbrica, la encriptación de los datos y la ciberseguridad. Otra importante decisión radica en la selección de la plataforma de análisis de datos [9,10,11,12,13].

La implementación del PdM 4.0 requiere de una elevada capacidad de gestión de proyecto, al mismo tiempo que de la creación de una estructura organizativa de apoyo [6]. En este contexto, resulta clave el desarrollo de una Cultura Digital en la organización de la entidad [14]. Se necesita preparar al personal que colabore en la implantación de este mantenimiento. El uso de

técnica y herramientas predictivas, necesita de un personal preparado y calificado.

Implicación de la implementación del PdM 4.0 para los países en vías de desarrollo

La implementación del PdM 4.0 no solo significa la incorporación de nuevas tecnologías, o nuevos elementos organizativos. A esto habría que sumar la inversión económica que representaría. Por esta razón, para los países en desarrollo, el asumir de forma más ágil el nuevo paradigma tendría que ir acompañada de estrategias orientadas a la aplicación de tecnologías de bajo costo y técnicas más robustas de análisis de *big data*. En este contexto habría que promover el aprovechamiento de la gama de sensores que se proporcione a costos cada vez más bajos, de los cada vez más baratos medios de almacenamiento, de la cada vez más amplia conectividad y de los cada vez más sofisticados algoritmos de análisis de *big data*.

Por las características de los países en desarrollo, el fomento de una Cultura Digital, de modo que permita a las empresas capitalizar las potencialidades de las tecnologías digitales, resulta clave para la implementación de la tecnología PdM 4.0.

Implicación para Cuba

Para nuestro país, además de las implicaciones de la implementación del PdM 4.0 comunes a los países en desarrollo, resulta imprescindible, el comenzar a establecer condiciones básicas de partida. Mínimamente, debe instalarse tecnología que asegure la "disponibilidad de datos" requerida para una efectiva implementación del PdM 4.0. En otras palabras, se necesita asumir el reto tecnológico de registrar, continuamente y en tiempo real, datos de sensores acoplados a diversos activos. De modo general, en nuestro país no se encuentra generalizada la utilización de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial. Solo en algunas industrias, fundamentalmente de la esfera energética, se han implantado sistemas de registro y análisis de datos provenientes de sensores, la cual consiste en tecnología desarrollada por firmas provenientes de países desarrollados. Esta es significativamente costosa, muchas veces no adecuada a las características propias del entorno industrial nacional y que genera unas relaciones muy complejas con los proveedores en virtud del complicado escenario de intercambio económico internacional que debe enfrentar el país.

En este contexto habría que atender la capacidad de la red de datos que estaría demandando el registro de gran cantidad de datos, así como la infraestructura de IoT orientada a cumplimentar los requerimientos de seguridad. Al respecto, es necesario señalar que este tipo de tecnología se ha instalado con orientación a procesos distintos que imponen requerimientos menos críticos en cuanto a capacidad de manejo de información y seguridad.

Asociado a este esfuerzo, debe marchar el fomento de una cultura innovadora, auténtica en este contexto industrial, que adopte un enfoque integral, más allá de la Cultura Digital que se requiere. Es necesario divulgar más sobre la necesidad creciente de implantar esta tecnología, de las ventajas que proporciona para una industria como la nuestra, y sobre todo, orientar el pensamiento transformador hacia el aprovechamiento de los recursos nacionales, fundamentalmente humanos, probadamente disponibles.

Pasos hacia la implementación del PdM 4.0 en Cuba (Resultados Parciales)

En el país existen condiciones apropiadas, como no existen en muchos países en vías de desarrollo, para transitar hacia la implantación gradual del PDM 4.0, considerando el tipo de activo al que se le aplicará dicho mantenimiento. La base fundamental se encuentra en la disponibilidad de capital humano formado, capaz de utilizar la tecnología involucrada e integrarla en el nuevo escenario con el nuevo objetivo concreto.

Al mismo tiempo que la industria nacional, sobre todo la básica, se ha mantenido superando a sus especialistas respecto a la utilización de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial, desde hace más de 10 años varios grupos nacionales de investigación se han mantenido realizando investigaciones orientadas al desarrollo de este tipo de tecnología, e incluso, la aplicación de algoritmos de diagnóstico.

Por lo cual, el objetivo de la investigación es presentar los fundamentos que pueden servir de base para el gradual tránsito hacia la implementación del Mantenimiento Predictivo (PDM) 4.0 en Cuba.

Métodos

El análisis arrojó que existen estudios con una implicación directa en la implementación del PDM 4.0 en nuestro país:

1. El proyecto: **Desarrollo de Tecnología de Monitoreo y Diagnóstico Industrial**, actualmente en ejecución, asociado al Programa Nacional Desarrollo Energético Integral y Sostenible.
2. Estudio piloto (en una central termoeléctrica) de implementación de Infraestructura asociada al Mantenimiento Predictivo 4.0.

Resultados

Se presenta lo obtenido de la implementación del PDM 4.0 en: el proyecto **Desarrollo de Tecnología de Monitoreo y Diagnóstico Industrial** y el estudio piloto (en una central termoeléctrica).

Proyecto desarrollo de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial

Este proyecto propone el desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico industrial en sus versiones *online* y portable, de forma tal que represente una alternativa de menor costo, adaptada a las condiciones nuestras y conectada a la dinámica del sistema empresarial y de innovación tecnológica nacional. El objetivo es desarrollar y validar este tipo de tecnología de forma tal que constituya punto de partida para el desarrollo a mayor escala de estos tipos de sistemas, orientados a la implementación de estrategias predictivas de mantenimiento, o su profundización, en la industria cubana. Con sus resultados, y la posterior aplicación de los mismos, se abriría la posibilidad de que las industrias puedan adaptar la tecnología de monitoreo y diagnóstico a sus requerimientos o necesidades particulares, e incluso, a la superación profesional y ganancia de experiencias de sus especialistas, de forma tal que puedan coordinar investigaciones independientes o cooperadas en el campo del diagnóstico industrial buscando hacer óptima la explotación de dicha tecnología.

F. E. HERNÁNDEZ-MONTERO, C. ANÍAS-CALDERÓN, M. L. RUIZ-BARRIOS

Existen varios trabajos previos, los cuales van desde la concepción de plataformas para la digitalización, procesamiento, almacenamiento y transmisión de las señales de sensores de vibración [15,16,17,18]. Pasan por el desarrollo de algoritmos propios para el monitoreo de la condición y el diagnóstico, hasta el desarrollo de software de alto nivel para hacer disponible, en una computadora, los parámetros requeridos [15,16,17,18]. Varios reconocimientos avalan estos trabajos, los cuales se han concretado con el alcance de un Premio Nacional 2021 de la Academia de Ciencias de Cuba [19].

La propuesta involucraría el desarrollo de un equipo electrónico, al cual están conectados un grupo de acelerómetros. Estos se fijan en diferentes puntos del sistema a monitorear. El equipo electrónico transmite las señales, vía *Wireless Fidelity* (WiFi), a un *AccessPoint*, o directamente a una computadora. Se incluye un programa en computadora que puede implementar múltiples funciones de monitoreo y diagnóstico. En esta propuesta se proporcionarían los acelerómetros de tipo capacitivos. Sin embargo, el equipo electrónico dispondría de entradas para la conexión de acelerómetros piezoeléctricos (con preamplificador) que se pueden adquirir comercialmente.

En concreto, la propuesta consistiría en:

- 8 Acelerómetros capacitivos
- Equipo electrónico
 - 8 entradas para acelerómetros capacitivos
 - 8 entradas para acelerómetros piezoeléctricos (con preamplificador)
 - 1 entrada de tacómetro
 - Transmisión *WiFi*
- *Software*
 - Modos
 - Básico

1 computadora de trabajo conectada al equipo. Los datos son registrados, almacenados y transferidos.

- De Monitoreo

Los datos pueden ser analizados desde varias computadoras (hasta 10). El software solo visualiza datos, no procesa.

- Funciones de análisis: FFT, *overall analysis*. Tiempo, ploteo de órbitas. Se incluyen indicaciones visuales de alarma. Se utilizan cursores para la visualización puntual.
- Procesamiento de Métricas: *Speed. Time data (min, max). Single frequencies (Over-All RMS, max line RMS)*.
- Monitoreo de Métricas: Level meter. Metric view (visual alarm). Digital display (visual alarm).
- SelfTests: Sobrecarga. Fuera de rango. Cable averiado. Errores de los front-end. Errores de Comunicación.
- De Monitoreo y Procesamiento

Los datos pueden ser analizados desde un mayor número de computadoras (hasta 20). El software incorpora análisis de tiempo real, se procesan datos. A las funciones de Monitoreo se adicionan:

- Funciones de análisis: Análisis de orden (basado en FFT). Tacho analysis. Visualización order magnitude. Detección de fallos en engranajes (usando

- tacómetro o no usando tacómetro). Detección de fallos en cojinetes de rodamientos (usando tacómetro o no usando tacómetro).
- Procesamiento de Métricas: Range of frequencies (Over-All RMS, max line RMS). Order magnitude (max line RMS).
 - Monitoreo de Métricas: Live recorder (visual alarm). Speed monitor (visual alarm).
 - Procesamiento: Generar señales virtuales (procesadas) resultantes de la realización de filtrados o de operaciones matemáticas, por ejemplo, integración sencilla o doble, filtrado paso bajo o paso alto, suma y diferencia.

Se cubrirían necesidades de monitoreo a través de equipamiento portátil con el desarrollo de un aditamento a fijar a un teléfono móvil que permita el registro de señales de acelerómetros. A través de una aplicación en el teléfono se estaría gestionando todo el proceso.

Con este proyecto se apoya, desde el aspecto Técnico, la implantación del PDM 4.0 en nuestro país.

Estudio piloto (en una central termoeléctrica) de implementación de Infraestructura asociada al Mantenimiento Predictivo 4.0.

Recientemente, fue desarrollado un acercamiento a la implementación de Infraestructura de PdM 4.0, derivando en la metodología a tener en cuenta[20]. Para ello se utilizó el caso de uso de una central termoeléctrica a la cual se aplicaron las diferentes etapas planteadas en el procedimiento.

Para realizar el estudio se tuvieron en cuenta:

- Características generales de la central termoeléctrica y de su proceso productivo.
- Activos involucrados. Análisis de criticidad.
- Metas del negocio.
- Señales a medir, umbrales de alarma (normas ISO, información del fabricante).
- Información de diagnóstico y mantenimiento disponible (documentos que recogen las características operacionales de los equipos, históricos de fallos, gastos asociados a la operación y mantenimientos de los equipos, etc.)
- Recursos disponibles (equipos, sensores, infraestructura de red, recursos para el mantenimiento, recurso humano calificado, etc.).
- Volumen de datos que se obtienen de los sensores.
- Seguridad de la infraestructura de Tecnología de la Información instalada.
- Características del procesamiento de datos.

Las principales determinaciones a las que se arribaron fueron:

- La empresa cuenta con información necesaria sobre mantenimientos desarrollados con anterioridad y un elevado presupuesto para las actividades de los mantenimientos a realizar en el año.

F. E. HERNÁNDEZ-MONTERO, C. ANÍAS-CALDERÓN, M. L. RUIZ-BARRIOS

- La empresa dispone tanto de equipos avanzados como de otros algo más obsoletos, pero que en conjunto garantizan la generación de energía. También dispone de los sensores e infraestructura de red instalados. Aunque para realizar los mantenimientos se requiere de recursos que en ocasiones son importados (por lo que a veces no se dispone de ellos), gracias al ingenio de los trabajadores se logra suplir tales indisponibilidades. La termoeléctrica posee recursos humanos calificados y tiene diseñado un programa de cursos de capacitación con el propósito de elevar el nivel de superación de sus trabajadores para que estos estén actualizados en las tecnologías que se desarrollan tanto a nivel nacional como internacional.
- La empresa cuenta con los sensores requeridos, distribuidos en los diferentes equipos.
- Relativo al volumen de datos que se obtienen de los sensores, se puede afirmar que este no es grande, pues los datos que se recogen están referidos a variables numéricas, es decir, son datos M2M.
- No es necesario diseñar y desplegar, con la seguridad requerida, una infraestructura de red, pues la empresa ya la posee y con las condiciones necesarias para transmitir por ella los datos que se requieren para realizar el PdM.
- Dado que uno de los objetivos técnicos es que los tiempos de retardo para la detección temprana de fallos sean mínimos, se propuso emplear la computación en la niebla o Fog Computing, la cual constituye un paso intermedio hacia la nube existente en el centro de datos de la UNE, si fuese necesario. Se plantea colocar el nodo niebla en el cuarto de control, de modo que este se pueda conectar vía inalámbrica a los sensores para obtener los datos necesarios para realizar el procesamiento.
- Para el *hardware* del nodo niebla se propuso la estación de administración inalámbrica de campo YFGW410 del fabricante YOKOGAWA, en aras de usar dispositivos de un mismo fabricante, pues los sensores que dispone la central son de este proveedor. Es un producto que brinda capacidades de gestión, alta confiabilidad y flexibilidad, además de un uso efectivo de los recursos inalámbricos. Asimismo, constituye la puerta de enlace que, junto con el punto de acceso YFGW510, logra garantizar la transmisión de los datos que se obtienen de los sensores hacia el servidor.
- A partir de la necesidad de acceder a la nube para hacer uso de sus servicios, se propuso el empleo del *switch* IDS-509CPP del fabricante Perle, empleando fibra óptica en la VPN de la UNE.
- Se consideró que la seguridad de la infraestructura de Tecnología de la Información instalada es adecuada. Sin embargo, para realizar exitosamente el PdM 4.0 es importante:
 - Atender el *firewall* que aísla la red interna de la externa, pues, se va a trabajar internamente con los datos que generan los sensores (el procesamiento es en la niebla y no en la nube de la UNE).
 - No habilitar puertos y protocolos en el nodo niebla que no sean necesarios.

EL CAMINO HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO 4.0 EN CUBA

- Crear una VPN entre los sensores y el nodo niebla.
- Establecer autenticación para el acceso a los sensores y al nodo niebla.
- Como el procesamiento de datos es local, no se prevé que existan grandes volúmenes de datos a analizar, por lo que no se requiere el empleo de la tecnología de *Big data* y se podrá acceder a la nube para la toma de decisiones empleando analítica predictiva.
- Para el procesamiento de los datos en la niebla se seleccionó el software FogLAMP versión 1.8.0.
- Para la toma de decisiones en la nube se propuso la herramienta Apache Spark.

La Infraestructura de PdM 4.0 se basaría en lo siguiente (ver Figura 1):

- La herramienta FogLAMP procesa los datos que envían los sensores al nodo niebla, basado en la estación de administración inalámbrica de campo YFGW410 y ubicado en el cuarto de control.
- En FogLAMP se obtienen y almacenan los parámetros definidos como parte de las metas técnicas (temperatura, presión, vibraciones relativas y absolutas en los equipos rotatorios y flujo) y se emiten alarmas ante sobre paso de umbrales.
- FogLAMP se integra con la infraestructura de datos que se encuentra en la nube de la UNE.
- En la nube de la UNE se instala la herramienta Apache Spark que le presta a la central termoeléctrica el servicio de analítica predictiva para la toma de decisiones con respecto al PdM 4.0. Gracias a esto, es posible anticiparse al fallo y dar soluciones.

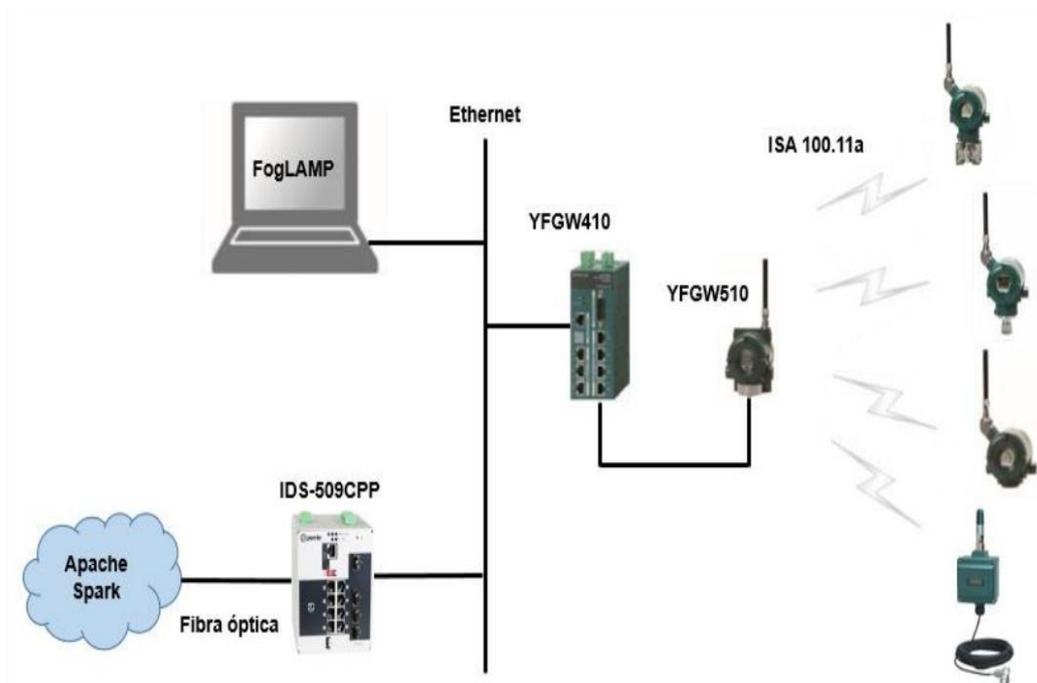


Fig. 1. Infraestructura para la obtención y procesamiento de los datos.

El diseño de red que se ha propuesto desplegar garantizaría la obtención de los datos de una manera segura y con la mayor precisión posible, permitiendo así, que estos se puedan gestionar en tiempo real en la niebla a través del FogLAMP. Con el empleo de esta tecnología, computación en la niebla, se lograría reducir los tiempos de respuesta. Consecuente a lo anterior, la utilización, además de la herramienta Apache Spark que brinda la computación en la nube, permitiría crear los modelos predictivos que facilitan la toma de decisiones, anticipándose así a averías que se puedan presentar en un equipo. De este modo, se consigue que el equipamiento siempre esté en óptimas condiciones, con lo que se mejoraría su rendimiento y se conduciría al cumplimiento del plan de generación de energía.

Discusión

La implementación del PdM 4.0 es vista como una cuestión inalcanzable del futuro lejano por factores, tales como: insuficiente tecnología instalada, elevado costo, desconocimiento, etc. Sin embargo, se ha demostrado que su alcance es posible y puede ser trazado.

Se han esbozado las implicaciones que reviste la implementación del PDM 4.0 en general, y en nuestro país de modo particular, y los pasos iniciales intencionales que se han comenzado a dar al respecto.

Conclusiones

1. El principal factor disponible para la implementación del PDM 4.0 en Cuba es el humano, aunque es necesario orientar el pensamiento innovador en el contexto industrial del país hacia el aprovechamiento de las capacidades nacionales.
2. En Cuba, existen dos iniciativas (una propuesta de proyecto y un estudio de caso de procedimiento) que muestran la capacidad de enfrentar la gradual implementación del PdM 4.0 en nuestro país.

Referencias

- [1] TIDDENS W., BRAAKSMA J., TINGA T. "Exploring predictive maintenance applications in industry". J. Qual. Maint. Eng. 2020, XXVIII: 68-85.
- [2] LES DIGITAL HEROES, *Q"u'est ce Que L'industrie 4.0?" L'agence Digitale Créative*. [en línea] [ref. de 13 de abril 2022]. Disponible en Web: <https://lesdigitalheroes.fr/quest-ce-que-lindustrie-4-0>.
- [3] KACZMAREK M.J., GOLA A. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing—An Overview. IFAC-PapersOnLine 2019, 52:91-96.
- [4] Lee J., Ni J., Singh J., Jiang B., Azamfar M., Feng "J. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing". J. Manuf. Sci. Eng. 2020, 142, 110805.
- [5] I-SCOOP, *"Predictive maintenance – increasing uptime and reducing risks"*. [en línea] [ref. de 05 de enero 2023]. Disponible en Web: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/predictive-maintenance-pdm/>.

- [6] PWC and Maininnovation, "*Predictive Maintenance 4.0. Predict the unpredictable*". [en línea] [ref. de 05 de enero 2023]. Disponible en Web: <https://www.pwc.be/en/documents/20171016-predictive-maintenance-4-0.pdf>.
- [7] RAN Y., ZHOU X., LIN P., WEN Y., DENG R. "A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches". [en línea] [ref. de 14 de octubre 2021]. Disponible en Web: <http://arxiv.org/abs/1912.07383>.
- [8] PECH M., VRCHOTA J. BEDNÁŘ J. "Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review". *Sensors*. 2021, XXI(1470).
- [9] MENTSIEV A.U., GUZUEVA E.R., "Magomaev T.R. Security challenges of the Industry 4.0". *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1515, 032074.
- [10] PEREIRA T., BARRETO L., AMARAL A. "Network and information security challenges within Industry 4.0 paradigm". *Procedia Manuf.* 2017, XIII:1253-1260.
- [11] PEDREIRA V., BARROS D., PINTO P. "A review of attacks, vulnerabilities, and defenses in industry 4.0 with new challenges on data sovereignty ahead. *Sensors*", 2021, XXI(5189).
- [12] CAKIR M., GUVENC M.A., Mistikoglu S. "The experimental application of popular machine learning algorithms on predictive maintenance and the design of IIoT based condition monitoring system". *Comput. Ind. Eng.* 2020, 151, 106948.
- [13] WANG J., XU C., ZHANG J., ZHONG R. "Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review". *J. Manuf. Syst.* 2021, 62:738-752.
- [14] FERNANDEZ T.M., FRAGA P. "A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0". *IEEE Access* 2018, VI:25939-25957.
- [15] PINO J, HERNÁNDEZ FE, GÓMEZ JC, VILLUENDAS Y. "Identification of Babbitt Damage and Excessive Clearance". *Journal Bearings through an Intelligent Recognition Approach. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2021;XII(4):526-33
- [16] RODRÍGUEZ A, HERNÁNDEZ FE, RUIZ ML. "Automatic Detection of Rolling Element Bearing Faults to Be Applied on Mechanical Systems Comprised by Gears". En: Chaari F., Leskow J, Wylomanska A, Zimroz R, Napolitano A. (eds) *Nonstationary Systems: Theory and Applications. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring, XVIII.* Springer, Cham. 2022. 217-34.
- [17] MARÍA L., HERNÁNDEZ F., Rodríguez A. "Algorithm for the detection of faults in rolling element bearings running under tacholeless and variable rotating speed conditions". *Surveillance, Vibrations, Shock and Noise, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace [ISAE-SUPAERO]*, Jul 2023, Toulouse, France.
- [18] RUIZ ML, HERNÁNDEZ FE, GÓMEZ JC, PALOMINO E." Tacho-less automatic rotational speed estimation (TARSE) for a mechanical system with gear pair under non-stationary conditions". *Measurement*. 2019;145:480-94.
- [19] HERNÁNDEZ F., RUIZ M., ET AL. "Contribución al desarrollo nacional de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial". *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. 2023; XIII (2).

F. E. HERNÁNDEZ-MONTERO, C. ANÍAS-CALDERÓN, M. L. RUIZ-BARRIOS

[20] TIÓ N. Procedimiento para implementar el Mantenimiento Predictivo basado en la Industria 4.0. [Trabajo de Diploma], La Habana, Cujae, 2020.

Sobre los autores:

Fidel Ernesto Hernández-Montero: Contribuyó en la conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización. Redactó el borrador original, revisión y editó el artículo.

Caridad Anías-Calderón: Colaboró en la investigación, metodología, software, supervisión, validación, visualización. Participa en la revisión y edición del artículo

Mario Luis Ruiz-Barríos: Colaboró en la Investigación, Metodología, Validación. . Participa en la revisión y edición del artículo.