

## PROCEDIMIENTO PARA IMPLEMENTAR EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA INDUSTRIA 4.0

Naiviv Tió Arencibia<sup>1</sup>, Caridad Anías Calderón<sup>2</sup>, Fidel Hernández Montero<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CTE Ernesto Guevara de la Serna, Santa Cruz del Norte, Provincia Mayabeque, <sup>2,3</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Marianao, Provincia Ciudad Habana

<sup>1</sup>e-mail: naiviv.ta@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: cacha@tesla.cujae.edu.cu

<sup>3</sup>e-mail: fhernandez@tele.cujae.edu.cu

### RESUMEN

Realizar mantenimiento en los sectores industriales es esencial y si este se puede hacer de forma predictiva, o sea, ejecutar acciones preventivas sobre los equipos antes de que ocurran fallos que los dejen fuera de servicio, lo que se conoce como mantenimiento predictivo, se disminuirán los tiempos de parada y se ganará en disponibilidad. Con la integración de las tecnologías de la Industria 4.0 (Internet de las cosas, computación en la nube, computación en la niebla, *Big Data*, inteligencia artificial, ciberseguridad y sistemas ciberfísicos, realidad virtual, entre otras) al mantenimiento predictivo, se logra que este sea más eficiente, consuma menos tiempo y permita tomar mejores decisiones, sin embargo, llevar a cabo dicha integración puede ser complejo. Para facilitar la realización del mantenimiento predictivo, en este trabajo se propone un procedimiento que lo implementa, empleando las tecnologías de la Industria 4.0. Este procedimiento consta de cuatro etapas: requerimientos generales, obtención de los datos, procesamiento de estos y ejecución del mantenimiento y fue validado con su aplicación al caso de uso de una central termoeléctrica.

**PALABRAS CLAVES:** Industria 4.0, mantenimiento predictivo 4.0, procedimiento.

## PROCEDURE FOR IMPLEMENTING PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON INDUSTRY 4.0

### ABSTRACT

Carrying out maintenance in industrial sectors is essential and if this can be done in a predictive way, that is, it is possible to carry out preventive actions on the equipment before failures occur that leave them out of service, which is known as predictive maintenance, the downtimes and will be earned on availability. With the integration of Industry 4.0 technologies (Internet of things, cloud computing, cloud computing, Big Data, artificial intelligence, cybersecurity and cyber-physical systems, virtual reality, among others) to predictive maintenance, it is achieved that this is more efficient, consumes less time and allows better decisions to be made, however, carrying out such integration can be complex. To facilitate the performance of predictive maintenance, this project proposes a procedure that implements it, using Industry 4.0 technologies. This procedure consists of four stages: general requirements, data collection, data processing and maintenance execution and it was validated with its application to the use case of a thermoelectric plant.

**INDEX TERMS:** Industry 4.0, predictive maintenance 4.0, procedure.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está viviendo un cambio muy acelerado en los procesos industriales impulsado por los últimos avances en las tecnologías de la información. Las fábricas inteligentes están remodelando el futuro de las industrias combinando flexibilidad y tecnología. El mantenimiento predictivo (PdM por las siglas del término en inglés *Predictive Maintenance*) forma parte de este proceso y en él juegan un rol importante las tecnologías de la Industria 4.0, en la medida en que se adaptan perfectamente con los principios de anticipación, eficiencia y productividad de la fábrica inteligente [1]. El denominado PdM ha sido resultado del constante trabajo que han desarrollado las grandes

industrias con el fin de anticiparse a los fallos, planificar las paradas, incrementar la disponibilidad de los equipos y reducir tanto los costos de reparación y mantenimiento como los costos de operación. En la actualidad para obtener la mayor eficiencia posible en los procesos industriales se necesita avanzar en el nivel de evolución en la implementación del mantenimiento, encontrándose el PdM, en su cuarto nivel, el más óptimo puesto que incorpora las tecnologías de Industria 4.0.

En muchos lugares, donde el mantenimiento predictivo es llevado a cabo de forma incipiente o no se ha comenzado a implementar, ayudaría mucho contar con una guía que permita implementarlo a su nivel más alto (cuarto nivel) considerando el desarrollo existente en las tecnologías de la información. En este trabajo se propone un procedimiento que integra las tecnologías de la Industria 4.0 en el mantenimiento predictivo. Dicho procedimiento para su validación se aplica al caso de uso de una central termoeléctrica.

## Tecnologías de la Industria 4.0

El sistema de manufactura se encuentra en un momento de evolución hacia el concepto de Industria 4.0, denominado “fábricas inteligentes”. Este término, gestado en Alemania en el año 2011, define un nuevo tipo de industria que representa un cambio paradigmático de fabricación inteligente y producción centralizada a descentralizada. Constituye la transformación a un nivel internacional de la producción industrial mediante la interacción de la tecnología digital y el internet con la industria convencional [2]. Un esquema que refleja la Industria 4.0 se muestra en la Fig. 1.



Figura 1: Esquema de Industria 4.0 [3].

Aunque no existe un consenso al respecto, el internet de las cosas (IoT por las siglas del término en inglés *Internet of Things*), el cómputo en la nube, *Big Data* y la analítica avanzada, así como la inteligencia artificial parecen ser los pilares tecnológicos más importantes en la Industria 4.0. Es que de estas tecnologías dependen: la escalabilidad de la capacidad de cómputo, el procesamiento y análisis de datos, la accesibilidad global a los servicios vía internet y la creación de nuevos procesos, productos y modelos de negocio [4]. Por IoT se puede entender la capacidad de las cosas y las personas para comunicarse a distancia, a través de Internet en cualquier lugar y a cualquier hora, gracias a las nuevas tecnologías.

Mediante el uso de todas las tecnologías que están involucradas en la Industria 4.0, constantemente se genera un volumen de datos que no es posible gestionar de la manera tradicional. Es cuando la tecnología *Big Data* entra en juego.

El paradigma *Cloud Computing* constituye un modelo que permite el acceso ubicuo, conveniente y bajo demanda a un conjunto compartido de recursos informáticos configurables (redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que pueden aprovisionarse y liberarse rápidamente con un mínimo esfuerzo de administración o interacción con los proveedores de servicios [5]. De hecho, la tendencia actual busca una automatización cuasi completa de dicha gestión e interacción.

Como elemento intermedio hacia la nube surge la tecnología *Fog Computing* o computación en la niebla siendo una plataforma altamente virtualizada que provee computación, almacenamiento y servicios de red entre los dispositivos del usuario (IoT), al ubicarse cerca de ellos, y los centros de datos en los que se emplea computación en la nube [6]. Además, posee una arquitectura descentralizada y basada en nodos niebla que pueden ubicarse en cualquier punto entre el dispositivo y la nube (ver Fig. 2). En este sentido, dichos nodos pueden implementarse en *routers*, *switches*, puntos de acceso (*WiFi*) y *gateways*.

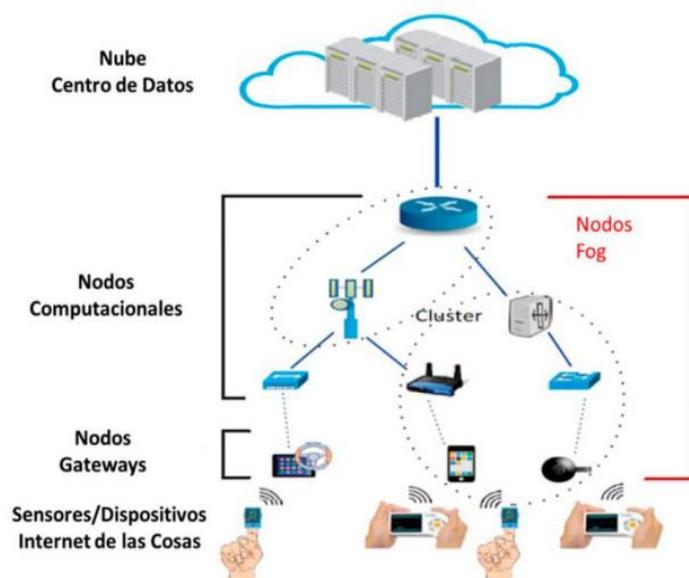


Figura 2: Arquitectura de un sistema *Fog Computing* [6].

La Inteligencia Artificial (AI por las siglas del término en inglés *Artificial Intelligence*) se basa en el desarrollo de algoritmos que permiten a las computadoras procesar datos, logrando así aprendizaje automático. Dichos algoritmos se nutren de datos y experiencias recientes lo que permite perfeccionarlos y habilitar a las computadoras con capacidades cognitivas propias de los seres humanos como visión, lenguaje, comprensión, planificación y decisión.

## Mantenimiento Predictivo (PdM)

El concepto de Mantenimiento Predictivo hace referencia a la planificación y ejecución anticipada de procedimientos de mantenimiento para evitar la ocurrencia de un fallo o avería en una máquina. Su utilidad se fundamenta en el hecho de mejorar el mantenimiento rutinario puesto que posee más recursos para compensar los modelos de control con la compartición de datos o a la contribución de la producción más sostenible porque maximiza la vida útil de las máquinas, mejora los procesos industriales, ayuda a minimizar el consumo de energía y recursos. La disponibilidad de los equipos es accesible mediante una red de datos que ofrece la posibilidad de proporcionar información para la mejora continua con una relación más estrecha entre producción y mantenimiento [7]. La Fig. 3 muestra un conjunto de tecnologías de la industria 4.0 involucradas en el mantenimiento predictivo.



Figura 3: Tecnologías involucradas en el PdM [8].

La aplicación de las tecnologías de la Industria 4.0 al mantenimiento predictivo permite su ascenso al cuarto nivel de madurez también conocido como PdM 4.0. Este consiste en la predicción de fallas futuras en los activos a partir de que se analiza su condición técnica, uso, entorno, historial de mantenimiento, equipos similares en otros lugares; en fin, todo aquello que pueda correlacionarse con el rendimiento de un activo.

Las ventajas de aplicar el PdM 4.0 en las empresas vienen dadas por la obligatoriedad de realizar la programación de las acciones de mantenimiento antes de que ocurran serias averías, pues al ser predictivo, se favorece que el mantenimiento se realice con más calidad y, además, permite que los fallos se detecten con suficiente antelación. Los análisis predictivos pueden llevarse a cabo en las paradas técnicas del servicio, con lo que no se pierde operatividad ni volumen de producción. Además, se considera una técnica *on-condition*, lo que significa que la mayoría de técnicas de mantenimiento predictivo se llevan a cabo con la maquinaria a pleno rendimiento. Así mismo, constituye un mantenimiento proactivo porque se predice lo que puede pasar, con lo que se pone remedio antes de que ocurra el mal, respetando el flujo de trabajo de la empresa y ofreciendo una producción de más calidad [9].

## 2. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL PDM BASADO EN LA INDUSTRIA 4.0

Para implementar exitosamente el PdM, no es suficiente conocer las tecnologías de la Industria 4.0, se requiere, además, tener claridad en los pasos que se deben seguir. Por ello, a continuación, se propone un procedimiento general, con enfoque *top-down*, el cual posee cuatro etapas o fases: Requerimientos generales, Obtención de los datos, Procesamiento de los datos obtenidos y Ejecución del PdM (ver Fig. 4).

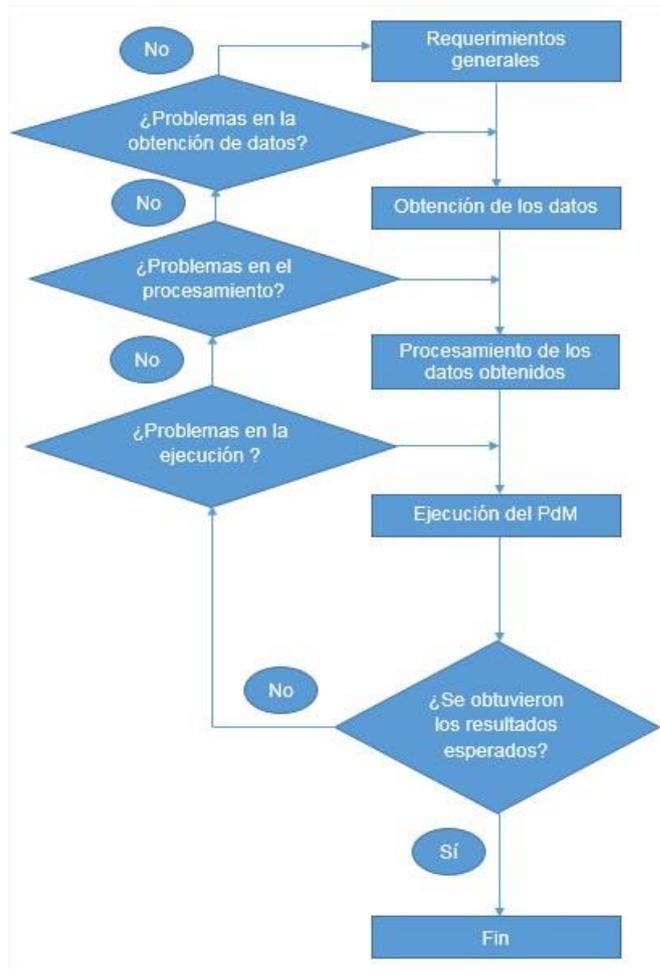


Figura 4: Estructura general del procedimiento propuesto para implementar PdM [Elaboración propia].

La fase de **Requerimientos generales** recoge los objetivos de negocio y técnicos establecidos para la implementación del PdM en una industria. En la fase de **Obtención de datos** se consideran los elementos tecnológicos que se requieren para adquirir los datos necesarios para realizar el PdM. En la siguiente fase, **Procesamiento de los datos obtenidos**, se define el lugar donde se realizará el procesamiento de los datos y las tecnologías a emplear. Finalmente, en la fase **Ejecución del PdM**, como indica su nombre, se realiza el mantenimiento predictivo y se evalúan sus resultados. De no ser los resultados satisfactorios, se retorna a la(s) fase(s) que lo provoca para modificarla(s), lo cual se repite hasta obtener un resultado satisfactorio. Cada una de estas etapas se explican a continuación.

### Etapa de Requerimientos generales

En esta etapa se realiza una caracterización bien detallada de la entidad donde se desea implementar el mantenimiento predictivo, así como de su sistema productivo. Vinculado a esto, se necesita listar e identificar claramente todos los equipos, fuentes de alimentación y controles existentes, así como definir cuál es la función de cada uno dentro del proceso productivo, clasificarlos y conocer sus condiciones operacionales. Además, se deben definir las condiciones operacionales de los equipos, para precisar cuál es el equipamiento crítico, es decir, realizar un análisis de criticidad basado en criterios específicos para esto, como: impacto en la producción, tiempo medio entre fallos (MTBF por las siglas del término en inglés *Mean Time Between Failure*), años de explotación y costos de mantenimientos.

Adicionalmente, un método bien estructurado para determinar la criticidad de los activos es el ABCD. Este utiliza un sistema de clasificación de máquinas en términos de gravedad de la ocurrencia de los fallos, regido por los siguientes requisitos:

- Incidencia del funcionamiento del equipo en la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de la industria.
- Complejidad tecnológica del equipo.
- Costo total del equipo.
- Recursos necesarios para la ejecución de sus mantenimientos.

Cada una de las máquinas que sean analizadas por el PdM deben clasificarse, atendiendo a los aspectos anteriores, en cuatro categorías: A, B, C y D, indicando un nivel de impacto alto (A), medio (B), bajo (C) y sin impacto (D) Asimismo, queda definido el nivel de criticidad que tienen los equipos en la industria, siendo este, alto, medio y bajo en las últimas dos categorías.

Como se expresó con anterioridad, en esta etapa se recogen también, los objetivos de negocio y técnicos. En el primero, se definen las metas que se quieren alcanzar, a partir de la implementación del PdM, con el fin de garantizar procesos de producción mucho más eficaces, logrando así que ocurran la menor cantidad de fallos posibles, lo cual es más efectivo a partir de la incorporación de nuevas tecnologías de la Industria 4.0. Asimismo, los objetivos técnicos que se requieren para el desarrollo del proyecto de mantenimiento predictivo están encaminados a: lograr mayor disponibilidad del equipamiento de la industria y con ello mejores resultados en la producción, emplear menores tiempos al ejecutar las acciones de mantenimiento correctivo y garantizar la fiabilidad de los datos para la elaboración de los modelos predictivos y la toma de decisiones. Para el cumplimiento de las metas técnicas se deben precisar los parámetros a medir y, con ello, los datos a obtener en los equipos, así como los umbrales permisibles. Otro aspecto que se debe precisar en esta etapa son los recursos que posee la entidad los cuales pueden ser recursos de información, recursos monetarios, recursos técnicos y recursos humanos.

## Etapa de Obtención de los datos

Una pieza fundamental del procedimiento que se propone es la obtención de los datos que brindan los sensores que deben estar ubicados en los equipos. Por ello, se requiere de una buena infraestructura de tecnologías de la información y tener conocimiento sobre los sensores y su instalación en los equipos, así como de los elementos que componen la red necesarios para transmitir la información recogida de los sensores. El buen funcionamiento de dicha infraestructura permitirá obtener la información necesaria para realizar el procesamiento que se lleva a cabo en la siguiente etapa del procedimiento.

En esta etapa, la primera acción a realizar es conocer si en la empresa se encuentra desplegada una infraestructura de tecnologías de la información que posibilite la obtención de los datos. Para ello se debe conocer si en los equipos de interés existen los sensores que se requieren y analizar el sistema de comunicación que se utiliza. Esto debe dar respuesta a la interrogante de si existe la infraestructura de tecnologías de la información necesaria para la obtención de los datos.

En caso de que no existan los sensores necesarios, hay que seleccionarlos e instalarlos, para lo cual se debe conocer:

- Tipos de sensores que existen en el mercado y sus usos.
- Criterios para la selección de los sensores.
- Volumen de datos que se obtiene con los sensores. Esto es necesario para contribuir a determinar los parámetros de diseño de la red (ancho de banda y latencia), así como para conocer si se requerirá utilizar en el procesamiento *Big Data*, entre otros.

Cabe destacar que, por las características de un proyecto de PdM basado en las tecnologías de la Industria 4.0, se hace necesario considerar la *Fog Computing* o computación en la niebla como elemento intermedio en la red para la transmisión de los datos hacia la nube. En caso de que se emplee computación en la niebla es necesario declarar cómo será el modelo de conectividad de la red para garantizar la comunicación de los nodos niebla con los sensores y con los niveles más altos, es decir la nube.

Finalmente, se recomienda analizar en esta etapa varias variantes de conectividad, cableada o inalámbrica (puede ser *WirelessHart*, *ISA 100.11a*, *6LoWPAN*, *WiFi*), para la obtención de los datos de los equipos con vistas a su

procesamiento para el PdM. Esto permitiría realizar una mejor selección de la infraestructura de tecnologías de la información a desplegar.

### **Etapas de Procesamiento de los datos obtenidos**

El procesamiento de los datos obtenidos de los equipos es crucial para realizar el PdM pues permite convertir estos en la información que se necesita para ejecutarlo. Además, facilita el uso de dichos datos en aplicaciones útiles para la toma de decisiones.

En consecuencia, lo primero que hay que precisar para efectuar el procesamiento de los datos, es el lugar donde estos se procesarán, que puede ser local (niebla) o en la nube. Para esto es necesario definir cuáles son los parámetros que requieren un tratamiento en tiempo real ya que, por su importancia, se debe dar una respuesta bien rápida en caso de fallos. Si es este el caso, se recomienda el empleo del procesamiento en la niebla, pues permite disminuir el tiempo de retardo o latencia al realizarse rápidamente el procesamiento de los datos y disminuirse el tiempo para la respuesta correctiva de ser esta necesaria.

Además, para el procesamiento de los datos se recomienda considerar el uso de la IA. Si se decide emplear esta tecnología, se deben tener en cuenta aspectos como el algoritmo a utilizar y las aplicaciones a usar.

Adicionalmente, para facilitar el procesamiento de los datos obtenidos de los equipos, es importante considerar la tecnología *Big Data* que forma parte de la Industria 4.0. Hay que tener en cuenta que esta tecnología se emplea solo en caso que se requiera el análisis de grandes volúmenes de información y, además, que es un servicio que típicamente se ofrece en la nube.

### **Etapas de Ejecución del PdM**

Una vez que se cuente con los elementos explicados en las etapas anteriores se puede pasar a la ejecución de PdM. Esto significa obtener los datos que envían los sensores ubicados en el equipamiento previsto y procesarlos para adquirir la información requerida (valores de los parámetros que se monitorizan y en especial el sobrepaso de los umbrales establecidos). El análisis de esta información debe permitir determinar dónde pudiera haber problemas y en caso de que estos existan, determinar cuáles son las acciones de mantenimiento que se deben realizar.

En esta etapa se debe evaluar el cumplimiento de los objetivos de negocio y técnicos del proyecto de PdM basado en la Industria 4.0. Si se cumplen, entonces se puede afirmar que el PdM se realizó satisfactoriamente. En caso contrario, se debe revisar cuales de las fases no se ejecutó correctamente.

## **3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL PDM BASADO EN LA INDUSTRIA 4.0**

Para validar el procedimiento de implementación del PdM basado en la Industria 4.0 que se propone en este trabajo, se utilizó el caso de uso de una central termoeléctrica en la cual se analizaron las diferentes etapas planteadas en dicho procedimiento. De acuerdo con esto, se partió de los requerimientos generales de la central termoeléctrica precisándose sus características, así como las metas de negocio y técnicas que se quieren alcanzar con la realización del PdM y los recursos con los que se cuenta. Seguidamente se analiza la infraestructura de tecnología de la información existente y la que se requiere para obtener los datos necesarios. A continuación, se explica la forma en que se debe realizar el procesamiento de los datos y, finalmente se ejecuta el PdM y se analizan los resultados obtenidos.

### **Requerimientos generales**

La termoeléctrica considerada en este caso de uso se clasifica como central térmica de ciclo convencional ya que produce electricidad a partir de combustible fósil (petróleo) mediante un ciclo termodinámico de agua – vapor. El término convencional se emplea para diferenciarla de otras centrales térmicas, como las nucleares o las de ciclo combinado.

Conocidas las características de la central termoeléctrica y de su proceso productivo, se precisan cuáles son los equipos que intervienen en la generación de electricidad. Estos son: turbinas, generadores, condensadores, bombas de alimentar, de circulación, ventiladores de tiro forzado (VTF) y ventiladores de tiro inducido (VTI), entre otros. A

partir de esto, se puede realizar el análisis de criticidad para definir cuál es el nivel de criticidad de los equipos, algo que se debe tener en cuenta para implementar el PdM. Basado en los criterios establecidos en el procedimiento propuesto se procede a clasificar los equipos como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de los equipos en cuanto al nivel de criticidad.

Sistemas	Equipos	Clasificación de equipos por categorías
Equipos principales	Turbinas	A
	Generadores	A
Agua de alimentar	Bomba de Agua de Alimentar (AA)	B
	Motor Bomba de AA	B
Agua de circulación	Bomba de Agua de Circulación (AC)	B
	Motor Bomba de AC	B
Condensado	Bomba de Condensado	B
	Motor Bomba de Condensado	B
	Bomba Enfriamiento	B
	Motor Bomba Enfriamiento	B
Aceite	Bomba de Aceite de Arranque	B
	Bomba de Aceite de Sellos CA (Generador)	B
	Bomba de Aceite de Sellos CD (Generador)	B
	Bomba auxiliar	B
	Bomba de emergencia de aceite	B
Aire y gases de caldera	VTF	B
	Motor del VTF	B
	VTI	B
	Motor del VTI	B

Como se aprecia en la Tabla 1 todos los equipos considerados en la central termoeléctrica tienen un nivel de impacto y criticidad alto y medio. De este modo, se establece como metas del negocio: garantizar que los equipos que

intervienen en la generación de energía funcionen adecuadamente, utilizar tecnologías avanzadas que permitan conocer y controlar las condiciones en que se encuentran los equipos. Al mismo tiempo, es facilitada la toma de decisiones ante cualquier anomalía para garantizar el correcto funcionamiento de la central termoeléctrica. Desde la perspectiva técnica, las metas son: crear las condiciones necesarias para alcanzar la disponibilidad de los equipos, reducir los tiempos de respuesta con el fin de que se puedan ejecutar rápidamente las acciones correctivas ante cualquier fallo y garantizar la fiabilidad de los datos, así como su adecuada gestión.

A partir de estas metas, los parámetros que se deben medir son: temperatura, presión, vibraciones relativas y absolutas en los equipos rotatorios y flujo. También, se establecen los umbrales en que deben encontrarse determinados parámetros para el adecuado funcionamiento de los equipos, a partir de las normas ISO 10816-3, NC-ISO 7919-2 y NC-ISO 10816-2 y de los umbrales recomendados por los fabricantes.

Adicionalmente, en la central termoeléctrica se cuenta con la información correspondiente a los mantenimientos desarrollados con anterioridad, lo que constituye una importante referencia. Además, posee un presupuesto asignado por la Unión Nacional Eléctrica (UNE) para las actividades de los mantenimientos que se realicen en el año.

En cuanto a recursos técnicos, la central termoeléctrica dispone tanto de equipos avanzados como de otros algo más obsoletos, pero que en conjunto garantizan la generación de energía. También dispone de sensores y de la infraestructura de red necesaria. Por otra parte, aunque para realizar los mantenimientos se requiere de recursos que en ocasiones no están disponibles por ser importados, gracias al ingenio de los trabajadores, se logra superar esta dificultad. Por último, la termoeléctrica posee recursos humanos calificados y tiene diseñado un programa de cursos de capacitación con el propósito de elevar el nivel de especialización de sus trabajadores y que estos estén actualizados en las tecnologías que se desarrollan tanto a nivel nacional como internacional.

## Obtención de los datos necesarios para realizar el PdM

Para la obtención de los datos se requiere de dispositivos IoT, específicamente de sensores distribuidos en los diferentes equipos. El volumen de datos que se obtienen de los sensores no es grande pues están relacionados con variables numéricas, es decir son datos M2M.

En este caso de estudio no es preciso diseñar y desplegar, con la seguridad requerida, una infraestructura de red pues, como antes se dijo, la termoeléctrica ya la posee y con las condiciones necesarias para transmitir por ella los datos que se requieren para el PdM. La mencionada infraestructura está estructurada como sigue: red inalámbrica basada en el estándar ISA 100.11a, que posee rango de acción de 600 m para la comunicación de los sensores con el sistema inalámbrico de campo compuesta por dispositivos del fabricante YOKOGAWA (YFGW410 y YFGW510), topología árbol y red cableada (Ethernet) para la transmisión de los datos hacia los servidores.

Adicionalmente, dado que uno de los objetivos técnicos es que los tiempos de retardo para la detección temprana de fallos sean mínimos, se decide emplear la computación en la niebla o *Fog Computing* que permite realizar procesamiento más cerca de la fuente de los datos constituyendo un paso intermedio hacia la nube existente en el centro de datos de la UNE. Por ello se consideró colocar el nodo niebla en el cuarto de control y que este se conecte vía inalámbrica a los sensores para obtener los datos que debe procesar.

Para el hardware del nodo niebla se seleccionó la estación de administración inalámbrica de campo YFGW410 del fabricante YOKOGAWA en aras de usar dispositivos de un mismo fabricante, pues los sensores existentes en la central termoeléctrica son de este proveedor. Este dispositivo brinda capacidades de gestión, alta confiabilidad y flexibilidad, además de un uso efectivo de los recursos inalámbricos. Asimismo, a través del punto de acceso YFGW510, permite la transmisión de los datos que se obtienen de los sensores.

Adicionalmente, a partir de la necesidad de acceder a la nube para hacer uso de sus servicios, se propone emplear el *switch* IDS-509CPP del fabricante Perle, que se conecta a través de fibra óptica a la red privada virtual (VPN por las siglas del término en inglés *Virtual Private Network*) de la UNE. Las características principales del mencionado *switch* son [10]:

- Funciona como dispositivo capa 3.
- 5 x puertos 10/100/1000Base-T.
- 1 x 100/1000Base-X SFP slot (vacío).
- 3 puertos combinados de doble propósito: Fibra 100/1000Base-X SFP o 10/100/1000Base-T.

- Conmutación avanzada, VLAN, cifrado y IEEE 1588 PTP.
- Puertos compatibles con PoE/PoE+ PSE, en plena conformidad con IEEE 802.3af/at.
- Soporte de protocolos PROFINET y Modbus TCP.
- Entrada de alimentación doble redundante 48 VDC.
- Temperatura de funcionamiento industrial entre -40°C y 75°C.

Para concluir esta etapa se revisó la seguridad de la infraestructura de tecnología de la información instalada encontrándose que esta es adecuada. Sin embargo, para realizar adecuadamente el PdM es importante: emplear el *firewall* que aisle la red interna de la externa, pues se va a trabajar internamente con los datos que generan los sensores ya que el procesamiento es en la niebla y no en la nube de la UNE; no habilitar puertos ni protocolos en el nodo niebla que no sean necesarios, crear una VPN entre los sensores y el nodo niebla y establecer autenticación para el acceso al nodo niebla.

### Procesamiento de los datos

Con la infraestructura de tecnologías de la información definida para la obtención de los datos, se tienen las condiciones creadas para entrar en la etapa donde estos se procesarán previo a la ejecución del PdM. De acuerdo a lo analizado hasta aquí se puede plantear que: el procesamiento de los datos es local, no existen grandes volúmenes de datos a procesar por esta razón, no se requiere el empleo de la tecnología de *Big Data* y se propone 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 [11]. Este software es de código abierto, emplea una arquitectura modular de microservicio que facilita el procesamiento de los datos de los sensores que son necesarios para obtener los parámetros definidos. Adicionalmente, realiza el procesamiento, almacenamiento, y reenvío de la información procesada a sistemas empresariales y servicios basados en la nube. Además, ofrece una solución integral para la distribución de recursos computacionales y la administración de datos, que combina la comunicación bidireccional norte-sur de datos y de metadatos en dirección este-oeste, en esto se emplean interfaces de programación de aplicación (API por las siglas del término en inglés *Application Programming Interface*) RESTful para comunicarse con sensores y otros dispositivos y para integrarse con la infraestructura de datos basadas en la nube.

Para la toma de decisiones en la nube se propone la herramienta Apache Spark, software de código abierto que ha alcanzado un elevado grado de madurez en el sector industrial por los beneficios que brinda. Estos beneficios están dados por la gran velocidad que ofrece para el procesamiento de datos a gran escala al realizarlo en memoria, por las optimizaciones que realiza y por poseer APIs, fáciles de usar para operar con grandes conjuntos de datos. Además, brinda facilidades para crear algoritmos que interpreten el conocimiento en datos muy complejos. Asimismo, constituye un motor unificado pues Spark viene empaquetado con bibliotecas de nivel superior, que incluyen soporte para lenguajes de consulta estructurada (SQL por las siglas del término en inglés *Structure Query Language*), transmisión de datos, aprendizaje automático y procesamiento de gráficos [12]. Con esto se asegura que el proceso de toma de decisiones sea más rápido y preciso.

### Ejecución del PdM en la central termoeléctrica

Una vez que se efectúan las etapas anteriores del procedimiento propuesto, se poseen las condiciones para realizar el PdM. En la Fig. 5 se muestran esquemáticamente los elementos considerados para la implementación del mantenimiento predictivo en el caso de uso analizado (central termoeléctrica) y estos se explican a continuación:

1. Los sensores existentes en la central termoeléctrica se comunican con el punto de acceso YFGW510 a través del estándar de conectividad inalámbrico, *ISA 100.11a* para transmitir los datos que obtienen.
2. El punto de acceso YFGW510 se comunica con el nodo niebla seleccionado (la estación de administración inalámbrica de campo YFGW410 del fabricante YOKOGAWA) la cual se previó ubicar en el cuarto de control.
3. La herramienta FogLAMP procesa los datos que envían los sensores al nodo niebla.

4. 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.
5. FogLAMP se integra con la infraestructura de datos que se encuentra en la nube de la UNE.
6. 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. Gracias a esto, es posible anticiparse al fallo y dar soluciones.

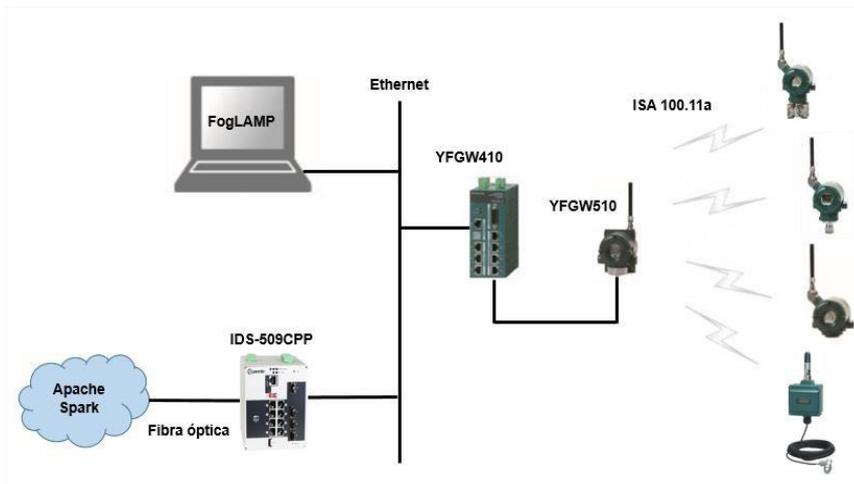


Figura 5: Esquema de los elementos utilizados para la obtención y procesamiento de los datos en el caso de uso de la central termoeléctrica.

El diseño de red realizado garantiza la obtención de los datos de una manera segura y con la mayor precisión posible, permitiendo que estos se puedan gestionar en tiempo real en la niebla a través del FogLAMP. Además, con el empleo de la computación en la niebla, se logran reducir los tiempos de respuesta.

Por otra parte, la utilización de la herramienta Apache Spark, que brinda la computación en la nube, permite 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 mejora su rendimiento y el cumplimiento del plan de generación de energía en su totalidad. A partir de lo antes dicho, se puede aseverar que en la central termoeléctrica las metas de negocio y técnicas planteadas para el PdM se cumplen de manera satisfactoria.

## 4. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de la presente investigación se logró elaborar un procedimiento para la implementación del mantenimiento predictivo basado en la Industria 4.0, donde se integran los principales elementos que se deben tener en cuenta en este proceso, arribándose a las siguientes conclusiones:

- El empleo de las diferentes tecnologías de la Industria 4.0 minimiza en gran medida el tiempo y los costos dedicados a mantenimientos, a la par que los flexibiliza y los hace más eficientes y certeros.
- El procedimiento elaborado para la implementación del PdM basado en la Industria 4.0 contiene cuatro etapas bien definidas: requerimientos generales, obtención de los datos, procesamiento de los datos y ejecución del PdM.
- La infraestructura de la red que se emplee para la obtención de los datos debe ser segura, robusta y escalable.

- El empleo del *fog computing* es necesario para lograr el procesamiento de los datos casi en tiempo real y, con ello, poder conocer en un tiempo mínimo el sobrepaso de umbrales en los parámetros que se monitorean.
- Es muy importante que, una vez que se realice el PdM, se evalúen las metas del negocio y técnicas que se querían alcanzar.
- El empleo en el caso de uso de una central termoeléctrica del procedimiento que se propone para realizar el PdM permitió comprobar la validez del mismo.

## REFERENCIAS

- [1] *¿Qué importancia tiene el Mantenimiento Predictivo 4.0 (PdM) para la fábrica inteligente?* (2018, abril). abasERP. <http://abas-erp.com/es/new/mantenimientopredictivo-40-para-la-fabrica-inteligente>
- [2] Ricardo Cabrera, H., Rodríguez Pérez, B., León González, J. L., & Medina León, A. (2020). *Ideas y conceptos básicos para la comprensión de las industrias 4.0*. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(4), 8-15.
- [3] Sampietro-Saquicela, J. L. (2020). *Transformación Digital de la Industria 4.0*. 5(8), 1344-1356. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1666>
- [4] Ynzunza Cortés, C. B., Izar Landeta, J. M., Bocarando Chacón, J. G., Aguilar Pereyra, F., & Larios Osorio, M. (2017). *El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras*. 54. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631006>
- [5] Roza-García, F. (2020). *Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0*. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177-192. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- [6] Mahmud, R., Koch, F. L., & Buyya, R. (2018). *Cloud-Fog Interoperability in IoT-enabled Healthcare Solutions*. 10. <https://doi.org/10.1145/3154273.3154347>
- [7] Rincón Mallo, N. (2021). *Implementación del Mantenimiento 4.0 en una empresa del sector industrial*. [Trabajo de Fin de Máster]. Universidad de Oviedo.
- [8] Mulders, M., & Haarman, M., & Vassiliadis, C. (2017). *Predictive Maintenance 4.0. Predict the unpredictable*. [www.pwc.com](http://www.pwc.com)
- [9] Luna Pérez, M. A., & Vázquez Álvarez, G. (2019). *Metodología de mantenimiento predictivo 4.0 para asegurar procesos de producción*. *Revista de Sistemas, Cibernética e Informática*, 16(2), 6. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- [10] *IDS-509CPPSwitch gestionado industrial PoE con fibra SwitchPoE + industrial de 9 puertos con puertos combinados*. (2020). Perle.
- [11] Dianomic Systems. (2020). *FogLAMP Documentation*.
- [12] Ilabaca, S. (2020, febrero). *¿Qué es Apache Spark?*

## SOBRE LOS AUTORES

Naiviv Tió Arencibia es graduada de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Actualmente se encuentra trabajando como ingeniera en adiestramiento en la Central Termoeléctrica Ernesto Guevara de la Serna. ORCID 0000-0003-1683-298X

Caridad Anías Calderón es doctora en ciencias técnicas, máster en Telemática e ingeniera en Telecomunicaciones. Actualmente es profesora titular, consultante y emérita de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Además, es la directora del Centro de Estudios de Telecomunicaciones e Informática de esta Universidad, presidenta de la comisión que elabora los planes de estudio nacional de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica y directora de la revista científica Telemática. ORCID 0000-0002-5781-6938

Fidel Hernández Montero es doctor en ciencias técnicas, máster e ingeniero en Telecomunicaciones. Actualmente es profesor titular de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Además, es el vicedecano de investigación y posgrado de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la CUJAE y miembro de la junta directiva nacional de la Asociación Cubana de Reconocimiento de Patrones. ORCID 0000-0002-5003-2807

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Manuscrito recibido: 16-1-2024, aceptado: 12-1-2025  
Sitio web: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

- **Autor 1:** Conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo.
- **Autor 2:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar, contribución a la idea y organización del artículo.
- **Autor 3:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar, contribución a la idea y organización del artículo.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

