

Diseño Conceptual de una Arquitectura para Monitoreo de Procesos Orientado a Industria 4.0

Concept Design of an Architecture for Processes Monitoring Targeted to Industry 4.0

Onell Hernández-Ramírez

ORCID: 0000-0002-6252-6564, Email: onell.hernandez@umcc.cu

Dirección de Informatización, Universidad de Matanzas

Ramón de Jesús López-Suárez

ORCID: 0000-0001-7178-2650, Email: ramon.suarez@umcc.cu

Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas

Marcelino Rivas-Santana

ORCID: 0000-0002-0305-515X, Email: marcelino.rivas@umcc.cu

Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas

Ramón Quiza-Sardiñas

ORCID: 0000-0003-1293-6044, Email: ramon.quiza@umcc.cu

Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas

Área Temática: 7 – Aplicación de la matemática, la estadística y la computación en la teoría de aproximación, teoría de grafos y optimización, modelos de ingeniería y energía, robótica, recuperación de imagen, reconocimiento de patrones y aplicaciones a otras ciencias.

Resumen: El trabajo presenta el diseño conceptual de una arquitectura de monitoreo de procesos industriales. Se basó en el uso de tecnologías de Industria 4.0, como sistemas ciberfísicos, computación en la nube, comunicación máquina a máquina, fabricación inteligente, realidad

umentada e Internet de las cosas. Requerimientos de descentralización, interoperabilidad, virtualización, respuesta en tiempo real y modularidad, fueron tomados en cuenta. Se seleccionó el protocolo MQTT como núcleo de la arquitectura propuesta, y no solo se diseñó el servidor (*broker*) sino también los clientes (módulos). Se incluyeron en el diseño clientes para la adquisición de datos, el modelado cognitivo artificial y la toma de decisiones. También se consideró un servidor de base de datos para el almacenamiento de datos históricos, con el correspondiente cliente de control. Finalmente, se incorporaron interfaces hombre-máquina para visualizar los datos adquiridos y computados, ya sea desde los mensajes MQTT o desde la base de datos.

Palabras claves: Arquitectura de monitoreo, Industria 4.0, Sistemas industriales.

Abstract: The work presents the concept design of an industrial processes monitoring architecture. It was based on the use of Industry 4.0 technologies, such as cyber physical systems, cloud computing, machine-to-machine communication, intelligent manufacturing, augmented reality, and Internet of things. Requirements of decentralization, interoperability, virtualization, real time response, and modularity were taken into account. The MQTT protocol was selected as the core of the proposed architecture, and not only the server (*broker*) but also the clients (*modules*) were designed. Clients for data acquisition, artificial cognitive modelling, and decision-making were included into the design. A database server was also considered for storing historic data, with the corresponding control client. Finally, human-machine interfaces were incorporated for visualizing the acquired and computed data, either from the MQTT messaged or from the database.

Keywords: Monitoring architecture, Industry 4.0, Industrial systems.

1. INTRODUCCIÓN

La primera revolución industrial, ocurrió a partir de finales del siglo XVIII y se distinguió por la introducción de máquinas de vapor en los sistemas de

manufactura, en lo que fue la primera sustitución significativa de la energía muscular (humana o animal) por energía mecánica en la actividad económica. La segunda revolución industrial (que comienza alrededor de 1870) se caracterizó por cambios significativos en los procesos de fabricación, no sólo debido al uso de la electricidad como fuente energética, sino también por la organización de las líneas de producción, que permitió la elaboración masiva de productos a bajo costo. En paralelo, se vivió una transformación inédita en el transporte (ferrocarriles, trasatlánticos y, a principios del siglo XX, automóviles y aviones) y en las comunicaciones (telegrafía, telefonía y la incipiente radiotelegrafía). La tercera revolución industrial (desde finales de los años sesenta del siglo XX) se caracterizó por la automatización y robotización, con circuitos electrónicos integrados en dispositivos como los microcontroladores, los controladores lógicos programables (*Programmable Logic Controllers*, PLC) y las computadoras digitales para ejercer la función de control de procesos (Klingenberg et al., 2022).

El mismo término Industria 4.0 apareció originalmente en Alemania en 2011 en la Feria de Hannover en apoyo de la economía alemana, y ha sido mencionado en documentos oficiales alemanes desde 2012. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta noción no es producto de científicos, sino de industriales, y por lo tanto debemos tener cuidado en su uso (Kowalikova et al., 2020).

Las dificultades para definir el concepto de Industria 4.0 han existido desde su inicio en 2011. Finalmente se aceptó que Industria 4.0 es un conjunto de tecnologías capaces de crear sistemas ciberfísicos dentro de las empresas y en las cadenas de suministro (Kagermann, 2015). Los supuestos del concepto Industria 4.0 formulados en las publicaciones de Schwab (2016) aún no se han realizado por completo, porque las inversiones tecnológicas requieren altos recursos financieros. Existe un gran potencial para la transformación digital de las empresas, pero los resultados de progreso global aún son pequeños. En algunas industrias, el cambio está progresando más rápido que en otras. En base a los indicadores utilizados por la UE para monitorear el nivel de digitalización, se puede concluir que el mayor desafío para las empresas sigue siendo la integración de la tecnología digital con la digitalización de servicios. Todavía queda mucho por

hacer en el camino de la transformación de las empresas a la Industria 4.0. Los elementos críticos son las altas inversiones y el ritmo de implementación de los cambios tecnológicos en empresas de diversas industrias. Las empresas se dan cuenta de las visiones de desarrollo de la Industria 4.0 y trabajan en los cambios para la Visión 2030 (Grabowska et al., 2022).

Dentro de la Industria 4.0, juegan un papel clave los sistemas de monitoreo, que permiten tanto la toma de datos como su interpretación mediante técnicas cognitivas artificiales para la detección de estados potencialmente peligrosos en los sistemas (Vivek & Kanagachidambaresan, 2022).

El presente trabajo tiene como objetivo realizar el diseño conceptual de una arquitectura para monitoreo de procesos industriales, orientada al paradigma de Industria 4.0.

2. METODOLOGÍA

Para el diseño de la arquitectura propuesta, se tuvieron en cuenta algunas de las principales tecnologías relacionadas con la Industria 4.0, los cuales se resumen a continuación:

- Sistemas ciberfísicos (*Cyber Physical Systems, CPS*): surgen de la integración de procesos informáticos y físicos que son componentes esenciales de las implementaciones de Industria 4.0. Integran funcionalidades de control e imágenes en los sistemas relevantes. La característica importante de estos sistemas es responder a cualquier retroalimentación generada. Los mismos constan de dos elementos importantes: (i) una red de objetos y sistemas que se comunican entre sí a través de Internet con una dirección designada y; (ii) un entorno virtual que se crea mediante la simulación informática de objetos y comportamientos en el mundo real (Oztemel & Gursev, 2020).
- Computación en la nube (*Cloud Computing*): Esta tecnología se considera importante, especialmente cuando la gestión y el análisis de datos es el enfoque principal de los sistemas (O'Donovan et al., 2019). Grandes volúmenes de datos se genera continuamente por todo lo que nos rodea. Cada proceso digital e intercambio de redes sociales produce datos. Los sistemas,

sensores y dispositivos móviles los transmiten. Los grandes datos llegan de múltiples fuentes a una velocidad, volumen y variedad alarmantes. Para extraer un valor significativo de los macrodatos, se necesita una potencia de procesamiento óptima, capacidades analíticas y habilidades de gestión de la información. Hazen et al. (2014), revisó ocho teorías que los investigadores pueden utilizar para examinar y aclarar la naturaleza del impacto de los macrodatos en la sostenibilidad de la cadena de suministro y presenta preguntas de investigación basadas en esta revisión (Seeger et al. 2022).

- Comunicación Máquina a máquina (*Machine-to-Machine*, M2M): Se refiere a la comunicación directa entre dispositivos que utilizan cualquier canal, alámbrico o inalámbrico. La comunicación máquina a máquina puede incluir instrumentación industrial, lo que permite que un sensor o medidor comunique los datos que registra al software de aplicación que puede usarlo (Panda et al. 2022).
- Fabricación inteligente (*Intelligent Manufacturing*): Tiene como objetivo optimizar la generación de conceptos, la producción y las transacciones de productos desde enfoques tradicionales hasta sistemas digitalizados y autónomos. Cuando la fabricación se puede definir como el proceso de varias fases de creación de un producto a partir de materias primas, la fabricación inteligente es el subconjunto que emplea control informático y altos niveles de adaptabilidad para lograrlo (Namjoshi & Rawat, 2022).
- Realidad aumentada (*Augmented Reality*, AR): Es una versión mejorada de la realidad en la que las vistas directas o indirectas en vivo de entornos físicos del mundo real se aumentan con imágenes superpuestas generadas por computadora (Gattullo et al., 2019).
- Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT): Es la interconexión de dispositivos físicos, vehículos, edificios y otros elementos integrados con dispositivos electrónicos, software, sensores, actuadores y conectividad de red que permiten que estos objetos recopilen e intercambien datos. Consta de cuatro capas principales: capa de percepción, capa de red, capa de soporte y capa de aplicación (Oztemel & Gursev, 2020).

Como características fundamentales de la Industria 4.0, que se incorporan a la arquitectura propuesta, se pueden identificar las siguientes (Landeta Echeberria, 2020):

- *Descentralización*: En Industria 4.0, la descentralización significa que las máquinas no dependen de la interferencia humana para funcionar. Los sistemas físicos tienen sensores conectados a una red, capaces de tomar decisiones automatizadas basadas en datos de rendimiento.
- *Interoperabilidad*: Es la capacidad de los sistemas físicos, los sistemas humanos y los sistemas informáticos para comunicarse entre sí, siguiendo estándares y protocolos comunes.
- *Virtualización*: Permite crear una instancia virtual de algo en lugar de una versión física. Los sistemas que usan la virtualización están mejor protegidos contra el malware y se pueden usar para buscar actualizaciones, ejecutar pruebas de software y probar diferentes configuraciones antes de presentar el resultado final.
- *Respuesta en tiempo real*: Se basa en sensores que alimentan datos y algoritmos que los procesan de forma instantánea. Estos datos y análisis en tiempo real brindan resultados inmediatos para respuestas más rápidas a los problemas e incluso mantenimiento predictivo.
- *Modularidad*: Permite que cualquier actividad de la línea de producción cambie inmediatamente. Con la conexión y desconexión de diferentes módulos, las empresas pueden fabricar productos únicos en secuencia sin reconfigurar toda la línea de ensamblaje.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La arquitectura se diseñó para cumplir con los requerimientos de ligereza, código abierto y capacidades cognitivas artificiales. Para cumplir con lo anterior, se concibió un diseño modular, basado, fundamentalmente en el protocolo de comunicación MQTT (OASIS, 2019), el cual es un protocolo para Internet de las cosas, diseñado como un transporte de mensajería de publicación/suscripción

extremadamente ligero que es ideal para conectar dispositivos remotos con un espacio de código pequeño y un ancho de banda de red mínimo (ver Fig. 1).

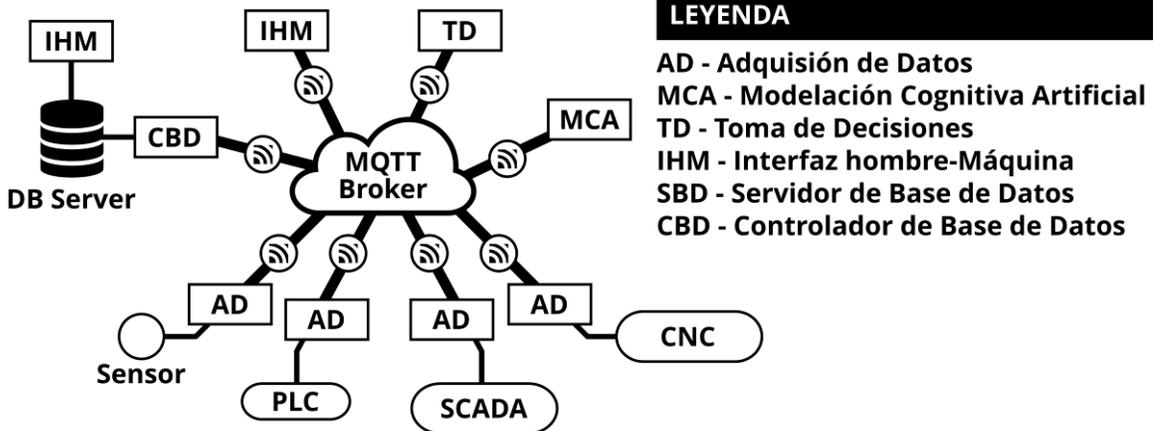


Figura 1: Diseño conceptual de LOIA-I4.0

El componente principal de la arquitectura es el servidor (*broker*) de MQTT, el cual actúa como oficina de correos, tomando los mensajes que emite cada cliente y reenviándolos a aquellos clientes que estén suscritos al tópico del mensaje. Dicho servidor podrá, en dependencia de la disponibilidad e intereses de la entidad donde se despliegue la arquitectura, ser implementado tanto en un servidor demandado como en la nube.

Otro componente clave del sistema son los clientes de adquisición de datos, los cuales sirven de interfaz con los dispositivos de campos, tales como sensores, controladores lógicos programables (*Programmable Logic Controlers*, PLC), SCADA y controles numéricos computarizados (*Computer Numerical Control*, CNC). Los módulos de adquisición de datos cuentan con un núcleo común y una pasarela específica que les permitirá capturar datos en dependencia del dispositivo al que estén conectados y sus respectivos protocolos de comunicación. Estos módulos deberán garantizar que los datos sean capturados y enviados antes de que se necesite una respuesta a partir de ellos, de forma que el sistema funcione en tiempo real.

El módulo o cliente de modelación cognitiva artificial, tiene como propósito estimar los valores de variables no medidas directamente por el sistema, a partir de

aquellas que sí lo son. Para ello, utiliza modelos cognitivos artificiales, basados en técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*), los cuales son reentrenados y actualizados cuando la disponibilidad de datos lo permita, siempre con la autorización del operador humano del sistema.

El módulo o cliente de toma de decisiones se implementa con el objetivo de, a partir del análisis de los valores de las variables operativas, medidas o calculadas, alertar sobre posibles estados del sistema que requiera la atención del operador humano del sistema. Para ello se utilizarán técnicas de razonamiento como la programación lógica, los árboles de decisión y la lógica borrosa.

Dado que el protocolo MQTT no prevé el almacenamiento de los datos históricos, se implementará un sistema paralelo, basado en un servidor de base de datos y un cliente que actuará como controlador del mismo. Este último capturará los datos emitidos como mensajes por los módulos de adquisición de datos y los enviará, a través de protocolo TCP/IP, al servidor de base datos, junto a información sobre el momento de la captura de los datos y su calidad.

Finalmente, para la visualización de los datos por el operador humano, se han concebido dos interfaces hombre-máquina. La primera, está dirigida a la visualización de los datos capturados directamente por los módulos de adquisición, los cuales llegan a la interfaz mediante mensajes de MQTT. La segunda, se enfoca a la visualización de datos históricos, almacenados en la base de datos, con la cual se comunica mediante protocolo TCP/IP. Ambas interfaces podrán contar con funcionalidades de realidad aumentada.

4. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo, se realizó el diseño conceptual de una arquitectura para monitoreo de procesos industriales, orientada al paradigma de Industria 4.0. El diseño propuesto de basa en el uso del protocolo MQTT, y cuenta con clientes para diversas tareas, tales como la adquisición de datos, la modelación basada en capacidades cognitivas artificiales, la toma de decisiones, la gestión de datos y la visualización de los datos y estados monitoreados.

Para su implementación efectiva, deben definirse un grupo de cuestiones como el lenguaje de programación a utilizar, el sistema de base de datos, la seguridad de la comunicación. Todos ellos pueden verse como continuación del presente trabajo, que lo complementarán.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba bajo el código PN223LH004-024.

REFERENCIAS

- Gattullo, M., Scurati, G. W., Fiorentino, M., Uva, A. E., Ferrise, F., & Bordegoni, M. (2019). Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
- Grabowska, S., Saniuk, S., & Gajdzik, B. (2022). Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. *Scientometrics*, 127(6), 3117-3144. <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04370-1>
- Hazen, B. T., Skipper, J. B., Ezell, J. D., & Boone, C. A. (2016). Big data and predictive analytics for supply chain sustainability: A theory-driven research agenda. *Computers and Industrial Engineering*, 101, 592-598. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.06.030>
- Kagermann, H. (2015). Change Through Digitization - Value Creation in the Age of Industry 4.0. In H. Albach, H. Meffert, A. Pinkwart, & R. Reichwald (Eds.), *Management of Permanent Change* (pp. 23-45). Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6>
- Klingenberg, C. O., Borges, M. A. V., & Antunes, J. A. d. V. (2022). Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon. *Technology in Society*, 70, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102009>

- Kowalikova, P., Polak, P., & Rakowski, R. (2020). The Challenges of Defining the Term "Industry 4.0". *Society*, 57(6), 631-636. <https://doi.org/10.1007/s12115-020-00555-7>
- Landeta Echeberria, A. (2020). *A digital framework for Industry 4.0: Managing strategy*. Palgrave Macmillan Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60049-5>
- Namjoshi, J., & Rawat, M. (2022). Role of smart manufacturing in industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 63, 475-478. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.620>
- OASIS (2019). MQTT Version 5.0. Retrieved 2022.10.20 from <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- O'Donovan, P., Gallagher, C., Leahy, K., & O'Sullivan, D. T. J. (2019). A comparison of fog and cloud computing cyber-physical interfaces for Industry 4.0 real-time embedded machine learning engineering applications. *Computers in Industry*, 110, 12-35. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.016>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Panda, S., Mondal, S., & Kumar, N. (2022). SLAP: A Secure and Lightweight Authentication Protocol for machine-to-machine communication in industry 4.0. *Computers and Electrical Engineering*, 98, 107669. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107669>
- Seeger, P. M., Yahouni, Z., & Alpan, G. (2022). Literature review on using data mining in production planning and scheduling within the context of cyber physical systems. *Journal of Industrial Information Integration*, 28, 100371. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100371>
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.