



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRONICA E
INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL EN PROCESOS DE
AUTOMATIZACIÓN**

Tema:

**“INTEGRATING ISA-95 AND IEC-61499 FOR
DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM MONITORING”**

Proyecto de trabajo de Graduación. Modalidad: Artículo Académico, presentado previo a la obtención del título de Ingeniería Industrial en Procesos de Automatización.

LINEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la Información y Sistemas de Control

AUTOR: Jairo Daniel Llamuca Supe

TUTOR: Ing. Mg. César Aníbal Rosero Mantilla

AMBATO- ECUADOR

Enero /2020

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de investigación sobre el tema: **“INTEGRATING ISA-95 AND IEC-61499 FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM MONITORING”** realizado por el señor Llamuca Supe Jairo Daniel, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial en Procesos de Automatización de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, enero de 2020

EL TUTOR



Ing. Mg. César Aníbal Rosero Mantilla

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

El presente proyecto de investigación titulado: “**INTEGRATING ISA-95 AND IEC-61499 FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM MONITORING**”, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato enero, 2020



Jairo Daniel Llamuca Supe

CI:1803596533

DERECHO DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación. Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regularidades de las Universidad.



Jairo Daniel Llamuca Supe

CI: 1803596533

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Franklin Salazar y el Ing. Santiago Altamirano, reviso y aprobó el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado: “INTEGRATING ISA-95 AND IEC-61499 FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM MONITORING”, presentado por el señor Erick Santiago Llamuca Supe de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.



.....
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.
PRESIDENTA DEL TRIBUNAL



.....
Ing. Franklin Salazar
DOCENTE CALIFICADOR



.....
Ing. Santiago Altamirano
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

*A **mi madre** quien, ha ido forjando mis valores con su ejemplo, quien me ha brindado su apoyo y amor durante este proceso y en todo ámbito de mi vida.*

*A **mi padre** que cuando ha podido me ha brindado su apoyo, quien me alentó siempre y se preocupó por que continúe hasta lograr este objetivo.*

*A **mi hermano, mi cuñada y mi sobrino**, quienes están siempre presentes ante cualquier necesidad y son un aporte importante en cada logro en mi vida. En especial a mi sobrino Gael, que llena de felicidad el hogar y es la fortaleza y la unión de la familia.*

*A **mis abuelitos** quienes siempre nos brindaban su cariño a todos sus nietos y fueron quienes ayudaron a fortalecer el carácter de cada uno.*

*De manera muy especial, a **Jessica**, quien ha estado pendiente en todo momento de mi progreso académico y personal, y nunca ha dejado de apoyarme, compartiendo todo el desgaste de este proceso, por tal motivo, este logro es tanto suyo como el mío.*

Jairo Daniel Llamuca Supe

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme, todo lo que he conseguido y lo que tengo hasta el día de hoy, por permitirme celebrar este avance académico con mis seres queridos, y por poner a mi lado a la gente correcta.

*Estas líneas tal vez sean muy cortas o la mente muy frágil para hacer llegar el agradecimiento de manera personal y no pretendo que nadie quede fuera de este contexto. Por tal motivo, agradezco a todos quienes han aportado de cualquier forma en todo el progreso de mi carrera universitaria. Un agradecimiento especial a; **Docentes y Administrativos** por compartir su conocimiento, experiencia profesional y la ayuda necesaria, **Amigos** por siempre brindar la ayuda en el momento indicado, **La Familia** por ser el pilar fundamental que sostiene en cualquier momento y por último, y no por eso menos importante, a **Jessica** que ha luchado contra mi necedad y ha logrado que avance incluso en contra de mis torpes decisiones.*

Jairo Daniel Llamuca Supe

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
RESUMEN EJECUTIVO.....	IX
SUMARY	X
1. INTRODUCTION.....	1
2. RELATED WORKS.....	2
3 STATE OF THE ART.....	4
4 METHODOLOGY.....	6
5 CASE STUDY.....	11
6 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	13
REFERENCES.....	14

RESUMEN EJECUTIVO

Las soluciones de automatización con el paso del tiempo han permitido relacionar e integrar diferentes aplicaciones, esto se dificulta cuando se involucran niveles funcionales de la organización, lo que requiere sistemas con mejor flexibilidad, interoperabilidad, y mayor escalabilidad e integridad en el manejo de información. Esto ha sido un detonante para el inicio de la Industria 4.0, que presenta soluciones con retos representativos, por lo que es de gran interés plantear métodos de diseño que faciliten la portabilidad de los sistemas de control y el intercambio de información entre los sistemas heterogéneos. Por este contexto, para el desarrollo de este proyecto se selecciona; el estándar ISA-95, para adoptar flexibilidad con un óptimo intercambio de información; el estándar IEC-61499, para dotar de portabilidad e interoperabilidad; y SOA, medio de integración en Industria 4.0. Este trabajo propone el desarrollo de una arquitectura de comunicación modular de sistemas distribuidos eficientes (de bajo costo) bajo el estándar IEC-61499, cuyos parámetros se supervisan enmarcadas en el flujo de información del modelo de equipos del estándar ISA-95, utilizando el marco SOA de OPC-UA con MQTT para su integración. El resultado muestra una arquitectura de comunicación ligera, flexible con mejor interoperabilidad y escalabilidad.

ABSTRACT

The automation solutions over time have allowed relating and integrating different applications; this is complicated when involving the organization functional levels, so they need systems better flexibility, interoperability, and greater integrity and scalability in information management. This has been a trigger for the startup of Industry 4.0, which presents any solution with representative challenges, so it is of great interest to propose design methods that facilitate the portability of control systems and the exchange of information between heterogeneous systems. For this context, for the development of this project is selected; the ISA-95 standard, to adopt flexibility with an optimal exchange of information; the IEC-61499 standard, to provide portability and interoperability; and SOA, integration way in Industry 4.0. This paper proposes the development of a modular communication architecture of efficient distributed systems (low cost) under the IEC-61499 standard, whose parameters are monitored framed to the data flow of the equipment model of the ISA-95 standard, using an OPC-UA's SOA framework with MQTT for its integration. In this paper, the result shows a flexible lightweight communication architecture with enhancing scalability and interoperability.

Integración de Isa-95 e Iec-61499 para el monitoreo de sistemas de control distribuido

Integrating Isa-95 and Iec-61499 for distributed control system monitoring

Jairo D. Llamuca¹, César A. Rosero¹, Carlos Sánchez¹, Marcelo García²

Resumen:

Las soluciones de automatización con el paso del tiempo han permitido relacionar e integrar diferentes aplicaciones, esto se dificulta cuando se involucran niveles funcionales de la organización, lo que requiere sistemas con mejor flexibilidad, interoperabilidad, y mayor escalabilidad e integridad en el manejo de información. Esto ha sido un detonante para el inicio de la Industria 4.0, que presenta soluciones con retos representativos, por lo que es de gran interés plantear métodos de diseño que faciliten la portabilidad de los sistemas de control y el intercambio de información entre los sistemas heterogéneos. Por este contexto, para el desarrollo de este proyecto se selecciona; el estándar ISA-95, para adoptar flexibilidad con un óptimo intercambio de información; el estándar IEC-61499, para dotar de portabilidad e interoperabilidad; y SOA, medio de integración en Industria 4.0. Este trabajo propone el desarrollo de una arquitectura de comunicación modular de sistemas distribuidos eficientes (de bajo costo) bajo el estándar IEC-61499, cuyos parámetros se supervisan enmarcadas en el flujo de información del modelo de equipos del estándar ISA-95, utilizando el marco SOA de OPC-UA con MQTT para su integración. El resultado muestra una arquitectura de comunicación ligera, flexible con mejor interoperabilidad y escalabilidad.

Palabras clave: Control Distribuido, IEC-61499, ISA-95, OPC-UA, Protocolo de comunicación MQTT.

Abstract:

The automation solutions over time have allowed relating and integrating different applications; this is complicated when involving the organization functional levels, so they need systems better flexibility, interoperability, and greater integrity and scalability in information management. This has been a trigger for startup of Industry 4.0, which present any solution with representative challenges, so it is of great interest propose design methods that facilitate the portability of control systems and the exchange of information between heterogeneous systems. For this context, for the development of this project is selected; the ISA-95 standard, to adopt flexibility with an optimal exchange of information; the IEC-61499 standard, to provide portability and interoperability; and SOA, integration way in Industry 4.0. This paper proposes the development of a modular communication architecture of efficient distributed systems (low cost) under the IEC-61499 standard, whose parameters are monitored framed to the data flow of the equipment model of the ISA-95 standard, using an OPC-UA's SOA framework with MQTT for its integration. In this paper, the result shows a flexible lightweight communication architecture with enhance scalability and interoperability.

Keywords: Distributed Control, IEC-61499, ISA-95, OPC-UA, MQTT communication protocol.

1. Introducción

La necesidad actual de optimizar los procesos de producción, para evitar perder competitividad, ha exigido a las organizaciones incorporar nuevas soluciones en sus procesos. Esto conlleva un avance tecnológico en la industria con el fin de impulsar a las

¹Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador ({jllamuca6533, cesararosero, carloshsanchez} @uta.edu.ec).

²Basque Country University, Bilbao, España (mgarcia294@ehu.es).

empresas a producir productos personalizados, pero que acarrea, según el análisis de (Keller, Rosenberg, Brettel, & Friederichsen, 2014), el incremento en la utilización de información en los procesos, conjuntamente con, la necesidad de desarrollar técnicas orientadas a un control distribuido y a sistemas de monitoreo integrados.

Las acciones de control y monitoreo son el centro de la necesidad del intercambio de información, estas adoptan una disposición jerárquica, que implica según (Wilamowski & Irwin, 2011; Zurawski, 2007), problemas de tráfico y bajas velocidades en el flujo de información, por la transferencia de datos frecuentemente incompatibles. Un perfecto conducto de comunicación para el control del flujo de datos, entre los niveles jerárquicos, es la integración vertical, que según (Ismail & Kastner, 2016), hoy en día es una ambición para ganar competitividad frente a sistemas modernos, debido a su enfoque de I4.0 (Industria 4.0) con vinculación a IoT (Internet of Things - Internet de las Cosas) Industrial.

Esta solución vertical permite la conectividad de una gran cantidad de dispositivos, sistemas y servicios, que procesan grandes cantidades de información, por lo que es esencial un monitoreo para la recopilación de datos representativos. El monitoreo es clave actualmente, sobre todo para superar en parte la carencia en el control de datos relacionados con la supervisión de parámetros de equipos y activos físicos, necesarios para tareas de evaluación de condiciones y diagnóstico de fallas; el contexto completo es estudiado a fondo en los sistemas de monitoreo de condición (Fleischmann et al., 2017).

Existe gran interés de organizaciones por acoger contribuciones que traten estos inconvenientes de interoperabilidad, con el fin de obtener una comunicación eficiente para una mejor disponibilidad de información y solucionar problemas de integración al ambiente de I4.0. En este ámbito; Los modelos de ISA-95 son suficientemente: flexibles, robustos, y perfectamente integrables, en entornos personalizados, para optimizar el uso de recursos y controlar el flujo de datos (Harjunkoski, Bauer, & Suresh, 2014), además, según (Wally, Huemer, & Mazak, 2017), permiten la integración con estándares de nivel bajo de automatización, incluso la jerarquía de ISA-95 es considerado un aporte vital en la evaluación de interoperabilidad según requisitos de I4.0 (Saturno, Ramos, Polato, Deschamps, & de Freitas, 2017).

La arquitectura definida en tipos de FBs (Function Blocks - Bloques de Función) por IEC-61499 proporciona beneficios de portabilidad e interoperabilidad en los niveles de planta, estos permiten optimizar recursos en sistemas flexibles, asimismo, posibilita la integración de aplicaciones distribuidas desde documentación de diseño y datos de otros estándares (Vyatkin, 2011).

Los Protocolos de Comunicación de IoT, garantizan la interoperabilidad entre sistemas incompatibles, ciertos protocolos pueden ser combinados sin perder interoperabilidad, según el análisis de (Fysarakis et al., 2016) y el estudio de (Al-Fuqaha, Mohsen, Mehdi, Mohammed, & Moussa, 2015), MQTT es un protocolo ligero y maduro que permite la agregación de datos de alta frecuencia desde la planta para una conectividad vertical, también permite ser combinado de manera perfecta con protocolos mediadores como OPC-UA en niveles altos; esto a impulsado al comité OPC en trabajar actualmente en una solución de OPC-UA PUB/SUB sobre el protocolo MQTT.

En razón a todo lo expuesto anteriormente. Este proyecto propone una arquitectura de comunicación ligera basado en IoT, para la supervisión desde la red, de los parámetros de equipos. Este trabajo presenta un método novedoso para extraer la información de interés de equipos y activos físicos. La interoperabilidad de la arquitectura permite que la información sea transferida en tiempo real desde la planta hacia el servidor encargado de ponerla a disponibilidad para la integración con herramienta compatibles de nivel de Gestión. Finalmente, la escalabilidad de la arquitectura permite añadir y publicar mayor parámetros de información en el servicio. De esta forma, se le permite al cliente final, supervisar en tiempo real, desde un navegador conectado a la red, la información de los parámetros de equipos y activos físicos que desee y evaluar su estado, para tomar decisiones con mayor precisión.

2. Trabajos Relacionados

En esta sección se da a conocer estudios, que además de tener relación con el presente proyecto, aportan al contexto del mismo. En tal razón, se presenta una serie de trabajos relacionados con plataformas de monitoreo/supervisión, que utilizan protocolos de comunicación habilitados para IoT e I4.0, así también empleando los estándares IEC-61499 e ISA-95.

Hästbacka et al. (Hästbacka et al., 2014) proponen una arquitectura de monitoreo escalable que proporciona información del estado de dispositivos de la planta a las aplicaciones de nivel empresarial, en este estudio utilizan OPC-UA como intermediador para facilitar el intercambio heterogéneo de información entre dispositivos de diferentes proveedores de manera confiable. De esta forma, logran el descubrimiento y el monitoreo dinámico de los dispositivos heredados del taller, sin embargo, al no utilizar un modelo de información óptimo en vez del modelado de información avanzada de OPC-UA, provoca mayor tráfico de datos, por lo que es necesario almacenar datos localmente de manera temporal hasta que la red este disponible. Un estudio similar es el de Hoffmann et al. (Hoffmann, Meisen, & Jeschke, 2017), que en cambio, utilizan modelos semánticos de sistemas multiagentes (MAS) inteligentes en el intercambio de información, a través de un espacio de direcciones de OPC-UA, para una ejecución mas ágil del sistema, pero que debido a la capacidad de aprendizaje de los agentes, es necesario equipos de alto rendimiento dentro del taller. En común, estos estudios dejan de lado su integración con normas adecuadas para procesos automatizados como IEC-61499 e ISA-95, y protocolos de comunicación que potenciarían el sistema de monitoreo como MQTT.

Mizuya et al. (Mizuya, Okuda, & Nagao, 2017), propone un caso de estudio de interés, en el que analizan la capacidad de adquisición de datos de los protocolos OPC-UA y MQTT, desde los dispositivos de campo, utilizando una tarjeta RPi como puerta de enlace. En este trabajo, se evidencia la eficacia de, OPC-UA en el control, y MQTT en el monitoreo de las variables del control. Sin embargo, es evidente las limitaciones del rendimiento de OPC-UA en equipos con características reducidas. También, se corrobora la agilidad de MQTT al publicar y suscribir mensajes desde los dispositivos de campo.

Otro trabajo interesante es el que presentan Wonder et al. (Wenger, Zoitl, Blech, Peake, & Fernando, 2016), en el cual proponen una novedosa infraestructura ágil de monitoreo basado en la nube, bajo el estándar IEC-61499. En el escenario de monitoreo que proponen, el lenguaje específico de domino, determina el tipo de comportamiento de los FBs, para recolectar, en un registro, los eventos y marcas de tiempo, desde variables concretas, sin afectar las funciones de control. Estos valores son publicados a los *topics* del *Broker* localizado en la nube, desde el cliente MQTT soportado por FORTE; de esta forma, su servicio de monitoreo se suscribe a los *topics* de registro del *Broker*, y logra la supervisión de las propiedades de los dispositivos de control desde la nube. Sin embargo, un modelo de referencia de información que facilite el desarrollo de interfaces automatizadas, como ISA-95/IEC-62264, no es cubierta en esta investigación, así como, la integración de nuevas normas de comunicación a nivel empresarial como OPC-UA.

Actualmente, el protocolo ligero de comunicación MQTT es muy popular para el desarrollo de sistemas de monitoreo en diferentes aplicaciones y entornos de beneficio social y empresarial, estudios como los desarrollados por (Alqinsi, Matheus, Ismail, & Darmalaksana, 2018; Grgić, Špeh, & Hedi, 2016; Mishra, Kumari, Sajit, & Pandey, 2018; Niswar et al., 2018), robustecen la capacidad del protocolo MQTT en comunicaciones basadas en IoT, sobre tarjetas controladoras inteligentes de bajo coste; así también, constatan la efectividad en la toma de datos y el monitoreo web en tiempo real de dispositivos de automatización industrial, heredados e inteligentes, también constatan el tamaño reducido de carga para transmitir los datos por mensajes.

Según estos estudios, las soluciones de monitoreo unicamente con OPC-UA, son una opción muy eficaz para la interoperabilidad de los sistemas, pero debido a, su mayor consumo de recursos y rendimiento en dispositivos intermediarios de nivel bajo, necesita

de un esfuerzo mayor en sistemas de bajo coste con ancho de banda limitado. Esto es todo lo contrario con sistemas de monitoreo utilizando unicamente MQTT, pero aún así, según el análisis de Ye et al. (Ye & Hong, 2018), OPC-UA tiene un mejor alcance en sistemas de alto nivel, debido a esto, el Cliente OPC-UA es utilizado como usuario final en aplicaciones IoT de capa empresarial, facilitando la integración de interfaces gráficas, para el monitoreo y administración de parámetros de configuración e información en tiempo real de los sistemas de campo. Esto motiva al presente proyecto en la utilización de MQTT a nivel de taller para la obtención de los parámetros de los dispositivos de campo, y OPC-UA para la presentación de los parámetros a nivel empresarial.

En resumen, estos trabajos tratan de utilizar técnicas que involucren el diseño y la utilización de nuevas infraestructuras de comunicación para conseguir el monitoreo de las variables de los dispositivos de campo bajo normas y protocolos específicos, como: IEC-61499, ISA-95, OPC-UA, y MQTT, pero no se centran en el diseño de sistemas que aprovechen la integración de estos estándares para lograr un sistema más útil en fabricas inteligentes, aprovechando el punto fuerte de cada uno de estos.

El punto de partida, para el presente proyecto, lo da el estudio de García et al. (García, Irisarri, & Pérez, 2017), el cual incentiva buscar soluciones que permitan reducir esfuerzos en la integración de CPPSs incorporando estándares compatible con OPC-UA.

3. Fundamentación Teórica

Esta sección presenta conceptos y características breves para el entendimiento de la arquitectura de monitoreo y el caso de estudio propuesto en el presente trabajo.

3.1. ISA-95/IEC-62264

El estándar ISA-95/IEC-62264 proporciona un modelo de referencia que prepara en categorías, el tipo de información que puede ser intercambiada para desarrollar interfaces automatizadas entre sistemas empresariales y de control. ISA-95 define de forma jerárquica los equipos, estos contienen parámetro y sus valores pueden ser mapeados a través de propiedades de tipo de dato o propiedades de objeto (Hood, 2015; ISA-Sp95, 2008). La disposición jerárquica de los equipos es flexible y permiten extender niveles mas abajo según la profundidad del análisis del sistema, así también, el estándar permite usar niveles de otras especificaciones (Janne, 2014).

La información del equipo basado en el rol representa la descripción abstracta de las instalaciones del sistema de automatización, cada equipo esta compuesto de piezas físicas que son representadas por el activo físico. Ambas se pueden relacionar mediante asignaciones (CENELEC, 2014).

3.2. IEC-61499

IEC-61499 es un lenguaje de modelado que facilita la representación de sistemas de control distribuido. El elemento principal de la arquitectura del estándar es el FB, este contiene características que permiten modelar aplicaciones complejas descentralizando su lógica de control para que sea factible la implementación de controles holónicos que hagan al sistema más flexible y con mayor interoperabilidad (CENELEC, 2003; Trejo-Hernandez & Lopez-Mellado, 2013). El estándar IEC-61499 proporciona tres tipos de Fbs: 1) Bloques de función básica (BFB), cuya ejecución interna está condicionada por graficas de control de ejecución (ECC) que consta de estados, transiciones y acciones de control de ejecución; 2) Bloques de función compuesta (CFB), cuya configuración permite encapsular una red de FB en otro FB u otros CFB interconectados y sincronizados; 3) Bloques de función de interfaz de servicio (SIFB), cuya función sirve para el control de dispositivos y permite asociar la aplicación del FB a un objetivo de hardware específico.

El proceso de diseño de FBs posibilita en gran medida la realización de tareas de control y supervisión sobre procesos industriales distribuidos, esto reduce el esfuerzo de ingeniería para tratar con datos de los sistemas distribuidos flexibles, el aporte de (Zoitl & Lewis, 2014), ofrece una descripción mas completa.

Existen varias herramientas software compatibles con IEC-61499, en especial, para el presente proyecto se ha utilizado 4DIAC, este software esta compuesto por 4DIAC-IDE y su entorno Runtime FORTE, que permiten el diseño y la ejecución de programas de control y monitoreo distribuido en pequeños dispositivos integrados (Zoitl, Strasser, & Ebenhofer, 2013).

3.3. OPC-UA

OPC-UA extiende la interoperabilidad de nivel de control de procesos al área de análisis de información, para: adquisición de datos, modelado de información, y comunicación entre aplicaciones, con seguridad y fiabilidad. La plataforma de OPC-UA aumenta la visibilidad y el alcance de conectividad, facilitando la comunicación de los sistemas heredados con los sistemas de Gestión en aplicaciones IoT, integrando así, con mayor facilidad, interfaces gráficas para el monitoreo y administración de parámetros de configuración e información en tiempo real de los sistemas de campo (Ye & Hong, 2018).

OPC-UA permite desarrollar y diseñar sistemas de comunicación que se distribuyen la ubicación de datos en la planta mediante modelos de comunicación *Client/Server*. El enfoque orientado a objetos de OPC-UA permite la generación de modelos de UA a partir de un modelo de información de objetos comunes de ISA-95, tal como, la información de equipos basado en el rol y la información de activos físicos; el modelo maximizado resultante contempla términos de ISA-95 y OPC-UA que pueden ser fácilmente distinguidos en modelos de información *NameSpace* dentro de cada *AddressSpace* (Ono, Ali, Hunkar, & Brandl, 2013).

3.4. MQTT

El protocolo MQTT trabaja sobre el protocolo de transporte TCP/IP para la transferencia de mensajes, este protocolo es muy ligero, por lo que es adecuado para recursos limitados y entornos restringidos con mínimo ancho de banda de la red. MQTT garantiza la entrega del mensaje en forma asíncrona mediante protocolos *Client-Server Publish-Subscribe*. Cualquier objeto IoT puede ser un Cliente *Subscriber-Publisher* MQTT, de manera complementaria, el *Broker* MQTT puede manejar la comunicación de miles de Clientes MQTT enlazados a un *Topic* específico. El mensaje entregado por MQTT es filtrado por *Topic*, que es una estructura jerárquica basada en texto, y se posiciona separando cada jerarquía con una barra oblicua (/) (Manandhar, 2017).

4. Metodología.

Un Sistema de Producción Modular (MPS) FESTO © es considerado para este trabajo, este representa un modelo a escala de un proceso industrial real. El MPS está compuesto por una estación de distribución y una estación de clasificación, cada estación cuenta con dos módulos; alimentación y transferencia, transportador y almacén, respectivamente.

En esta sección se presenta la composición hardware requerida por el sistema y la arquitectura del sistema propuesto para el monitoreo basado en IoT del MPS.

4.1. Arquitectura Hardware

La Arquitectura Hardware esta compuesta por las tarjetas de bajo coste Raspberry Pi 3 modelo B+ (RPI3) y BeagleBone Black (BBB). Ambas son ordenadores de placa

reducida que permiten trabajar con sistemas operativos (SOs) de código abierto desarrollados para dispositivos embebidos, estas tarjetas llevan instaladas distribuciones basadas en Linux Debian. Por un lado, RPi3 con Raspbian Stretch, y BBB con Debian Stretch pre-instalado.

En cuanto a las características hardware de las tarjetas. La RPi3 cuenta con: un procesador quad-core-64bits de 1.4GHz con 1GB de RAM, un terminal de interacción GPIO de 40 pines, puerto de comunicación Ethernet, 4 puertos de comunicación USB 2.0, capacidad de conexión wireless LAN y Bluetooth, y un puerto de expansión micro SD para la carga del SO y almacenar los datos. La BBB cuenta con: un procesador AM335x de 1GHz con 512 MB de RAM, dos terminales de propósito general GPIO con 46 pines cada uno, un puerto de comunicación Ethernet, un mini-puerto USB cliente para comunicación y alimentación, un puerto de comunicación USB 2.0, y un puerto de expansión micro SD para almacenamiento.

Para hacer posible que las tarjetas se comuniquen con señales industriales, es necesario emplear un circuito diseñado para tener lectura de sensores de 3.3v a 5v admitidas por las terminales I/O de las tarjetas.

4.2. Arquitectura de Comunicación General

La arquitectura de comunicación general del sistema de monitoreo propuesto se presenta en la *Figura 1*. Este sistema se basa en la combinación de los protocolos de IoT MQTT y OPC-UA, asignando una aplicación para cada protocolo. Atribuir la transferencia de información a diferentes protocolos, y en aplicaciones con condiciones donde estos mejor se desenvuelven, permite maximizar la capacidad del sistema. En tal motivo, el sistema se divide en dos aplicaciones específicas; la aplicación de integración para la obtención del estado de los dispositivos y/o componentes de nivel de campo y la aplicación de interfaz visual con el fin del monitoreo de la información obtenida. MQTT es usado para la adquisición de información, y OPC-UA es usado para la toma de datos significativos de la interfaz gráfica.

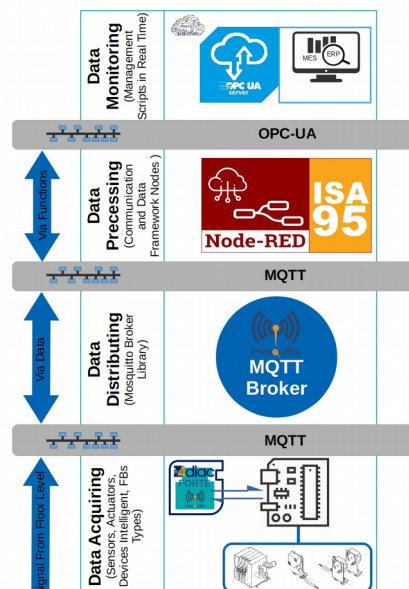


Figura 1. Arquitectura General de Comunicación del Sistema de Monitoreo propuesto.

4.2.1 Aplicación de Integración

Aquí los dispositivos se conectan a las tarjetas para adquirir la información de su estado, es decir, se integra el proceso físico con el sistema, utilizando MQTT y FBs. El

uso de FBs en la lectura de señales desde los pines GPIO de las tarjetas, facilita la distribución de la lógica de ejecución en el hardware, añadiendo flexibilidad al sistema. Los tipos de FBs necesarios están contenidos en aplicaciones de IEC-61499.

4Diac utiliza una librería de descripción de dispositivo para cada tarjeta, de esta forma permite mapear las aplicaciones IEC-61499 a cada dispositivo a través de sus recursos. Sobre la red de FBs, la información obtenida es transmitida a FBs diseñados (*Figura 3 y 4*) para almacenar las especificaciones del equipo. Luego esta información es publicada al *broker* dentro de *topics* determinados por el proveedor, bajo el direccionamiento de SIFBs configurados a modo de clientes MQTT, como se muestra en la *Figura 2*. El *broker* distribuye la información a los clientes subscriptores en el nivel superior.

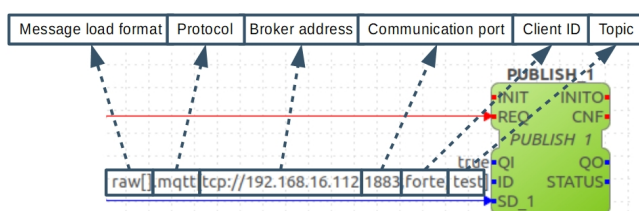


Figura 2. Configuración del SIFB para la comunicación con el *Broker*.

4.2.1.1 Conjunto de FBs diseñados

Para el diseño de los FBs que se muestran en la *Figura 3*, se toma como referencia la información requerida por los modelos propuestos de ISA-95.

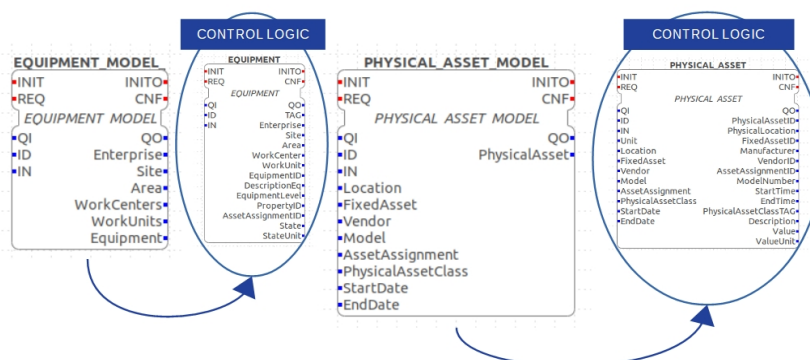


Figura 3. Interfaz de FBs para la transmisión de datos de Equipos y Activos Físicos.

A. FBs de Modelo de Equipo

El FB *EQUIPMENT* es un BFB, este es el FB principal, contiene la información requerida de todos los equipos dentro del algoritmo de control en su ECC. A diferencia de la información del estado del equipo, el resto de información contenida se mantiene constante, y es extraída de acuerdo a la identificación del equipo. La interfaz del FB *EQUIPMENT* se muestra en la *Figura 3*, este cuenta con un flujo de eventos comunes al de un FB típico. En el flujo de datos: 1) el dato QI está enlazado con el evento INIT e inicializa el BFB cada vez que se solicita un evento INIT; 2) el dato ID contiene la identificación del equipo; 3) el dato IN contiene el valor actual del pin asignado al equipo; 4) el dato QO informa sobre el estado del último evento ejecutado en el BFB; 5) los datos Enterprise, Site, Area, WorkCenters, WorkUnits, corresponden a la información de la jerarquía de cada equipo basado en el role, según ISA-95; 6) el resto de datos de salida corresponden a los atributos propuestos por el modelo de información de ISA-95.

El FB *EQUIPMENT_MODEL* es un CFB, este contiene una red de FBs dedicados, unos para la conversión de datos, y otros para la construcción de la cadena tipo string con todos los atributos del BFB *EQUIPMENT*, cada uno separado por un carácter del abecedario. La interfaz del FB *EQUIPMENT_MODEL* también se muestra en la *Figura 3*, en este los evento INIT, REQ, INITO, CNF, y los datos QI, ID, QO, Enterprise, Site, Area, WorkCenters, WorkUnits, son conectado directamente a su correspondiente del FB *EQUIPMENT*. Por otro lado: 1) el dato IN pasa a tipo *string* antes de conectarse al dato IN del FB *EQUIPMENT*; 2) el dato Equipment ofrece la cadena string de todos los atributos con su carácter de separación.

B. FBs de Modelo de Activo Físico

El FB *PHYSICAL_ASSET* es un BFB y el FB *PHYSICAL_ASSET_MODEL* es un CFB, estos FBs presentados en la *Figura 3*, poseen características de diseño similares a los FBs *EQUIPMENT* y *EQUIPMENT_MODEL*, pero con referencia al modelo de activos físicos. Su diferencia es notable en la interfaz de los FBs, diferencias como: 1) aumenta datos de entrada debido a que los activos físicos son considerados por ISA-95 como equipos físicos que pueden ser reemplazados, por lo tanto la mayoría de sus atributos cambian periódicamente; 2) los datos de salida Enterprise, Site, Area, WorkCenters y WorkUnits, de la jerarquía de equipo, no son considerados para el modelo de activos físicos; 3) los atributos de los activos físicos son diferentes a los atributos de los equipos.

Debido a que la condición *raw[]* en los parámetros de comunicación (*Figura 2*) admite solo el tipo de dato *string*, todas las salidas de los CBFs son de tipo *string* para evitar problemas de comunicación.

4.2.2 Aplicación de Interfaz Visual

Para una visualización óptima, esta aplicación permite presentar gráficamente una interfaz con la información obtenida de los dispositivo de campo. Por tal motivo, el entorno de interconexión interno de esta aplicación cumple tareas para la depuración de información y la presentación de información al usuario.

La depuración acarrea todo el procesamiento de información, esta se compone de etapas de recepción, estructuración y transmisión de información, estas etapas se comunican entre si a través de un flujo de mensajes en el entorno de trabajo de NodeRED. El nodo cliente subscriptor MQTT actúa para la etapa de recepción de información, este adquiere la información de tipo *string* y sin formato desde el *broker*. La etapa de estructuración es primordial, en primera instancia, da un formato al mensaje, descomponiendo la cadena *string* larga con los atributos que se adquiere desde el *broker*, mediante nodos de configuración como se muestra en la *Figura 4*; el conjunto de nodos de ISA-95 cumple el papel fundamental de esta etapa. Finalmente, el Servidor OPC-UA propio del conjunto de nodos de ISA-95 guarda la información en *NameSpaces* para la etapa de trasmisión de información. El resultado de la tarea de depuración es información estructurada según la norma ISA-95 para que esta sea adecuada a I4.0, además el usuario puede configurar que información se transmitirá a la interfaz de visualización. Hay que tomar en cuenta que debido a que el nodo de estructuración de ISA-95 no admite datos tipo *string*, es necesario hacer la conversión antes del ingreso a este.

La presentación de información permite el monitoreo estructurado de los equipos y activos físicos del proceso. Para la presentación de información el entorno de trabajo en NodeRED, cuenta con un nodo Cliente OPC-UA y el conjunto de nodos de interfaz gráfica para el servidor web de *dashboard*. Aquí el usuario puede determinar la distribución de interfaz final, debido a que, puede crear múltiples marcos o grupos de visualización en diferentes pestañas según sus necesidades.



Figura 4. Formato de mensaje en el procesamiento de información.

4.3. Flujo de Información del Sistema

El flujo de información del sistema de monitoreo propuesto, se puede apreciar en el diagrama de secuencia de la *Figura 5*. En el cual, para habilitar el flujo de información los componentes de MQTT y de OPC-UA deben estar iniciados. Cuando el MQTT *broker* y el OPC-UA *server* son iniciados, habilitan sus direcciones IP para que los clientes MQTT y OPC-UA respectivamente, puedan conectarse e iniciar el flujo de información.

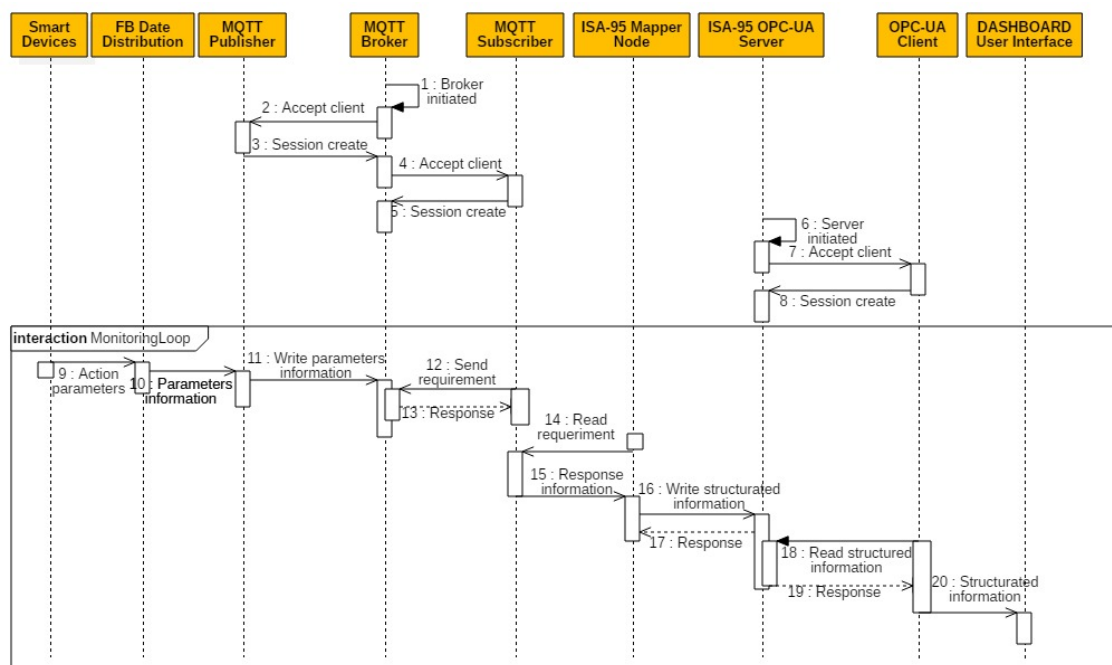


Figura 5. Diagrama de secuencia del flujo de trabajo y mensajería del sistema de monitoreo.

El bucle del flujo de información es conciso. La información que ingresa a las tarjetas inteligentes, es obtenida constantemente al inicio del flujo de información por la red de FBs, esta red añade información de parámetros propuestos por ISA-95 al mensaje, luego esta información es publicada a través de un cliente MQTT, soportado por FORTE, hacia un espacio de dirección *topic* del *broker* MQTT, posteriormente el cliente suscriptor MQTT obtiene el mensaje sencillo y lo envía en seguida, para su depuración y estructuración según especificaciones de ISA-95, en secuencia la información estructurada dentro del mensaje, es escrita en un espacio de nombres del servidor OPC-UA, después de un direccionamiento el cliente OPC-UA lee la información estructura, descompone el mensaje y finalmente lo envía a un servidor web con tecnología IoT de interfaz gráfica *dashboard* para su presentación visual y posterior monitoreo.

La sesión MQTT se constituye cuando el cliente publicador MQTT soportado por FORTE y el nodo cliente suscriptor MQTT soportado por NodeRED establecen la comunicación añadiendo la dirección IP del *broker* y configurando el puerto de comunicación. De forma semejante para establecer la sesión OPC-UA, el servidor OPC-

UA debe aceptar el requerimiento de conexión del cliente OPC-UA una vez localiza la dirección IP del servidor OPC-UA en el puerto de comunicación.

5. Ejemplo Práctico

En esta sección se presenta una configuración de ejemplo del sistema de monitoreo propuesto. Las dos estaciones del MPS son consideradas para el diagrama del flujo de información del caso práctico que se muestra en la *Figura 6*, pero finalmente solo el módulo de alimentación, específicamente el equipo apilador es considerado para el monitoreo.

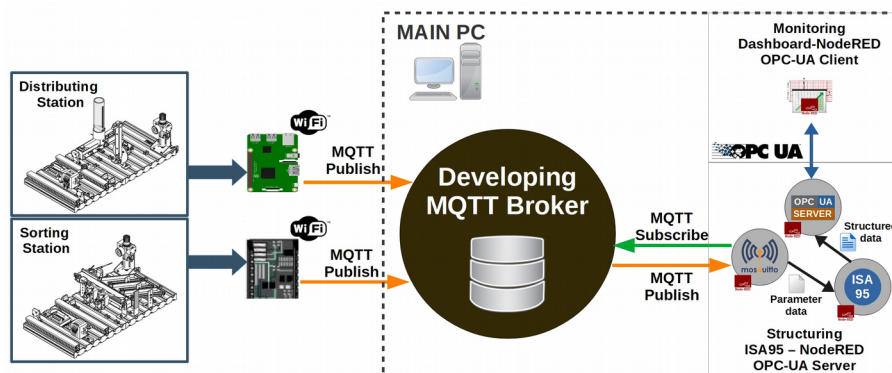


Figura 6. Diagrama de flujo de trabajo del sistema para el caso de estudio.

Entre la composición hardware que requiere el sistema; la tarjeta RPi 3 es usada como medio de adquisición de parámetros de la estación de distribución y la tarjeta BBB como medio de adquisición de parámetros de la estación de clasificación; ambas tarjetas de periferia distribuida, ejecutan el Runtime FORTE, y trabajan como clientes MQTT para la publicación de los parámetros. La comunicación del sistema con las tarjetas se realiza mediante conexión wifi a la red industrial, de esta forma la PC principal se puede comunicar a las tarjetas por medio de una conexión ethernet a la red industrial. La PC principal configura el *broker*; así también, el entorno de trabajo de NodeRED con los clientes suscriptores MQTT, la estructuración de la información según ISA-95 y el servidor OPC-UA. Los clientes OPC-UA se configuran en otro entorno de trabajo.

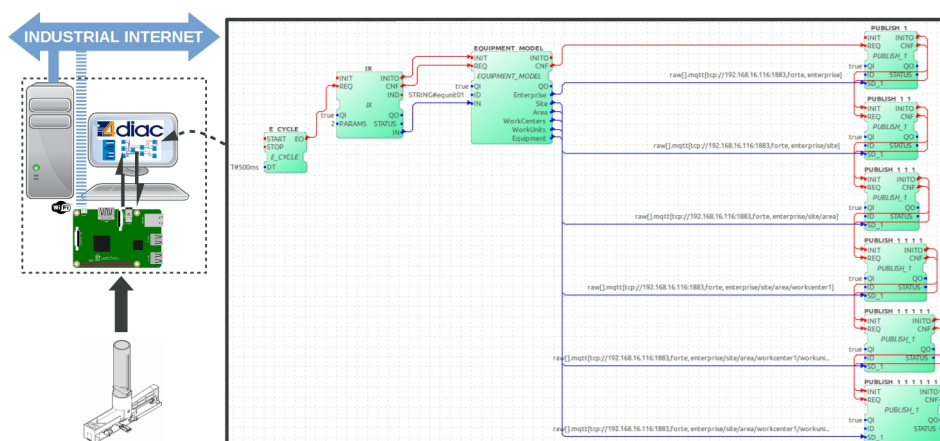


Figura 7. Flujo de FBs en 4DIAC para adquirir y transmitir los parámetros del equipo apilador.

La aplicación de integración para la obtención de los parámetros del apilador se muestra en la *Figura 7*, en este se observar la obtención del estado del equipo conectado en el pin GPIO2. Las etapas de recepción, estructuración y transmisión para la tarea de

depuración, así como, la aplicación para la presentación de datos en la interfaz visual se muestra en la *Figura 8*.

La *Figura 9*, muestra la interfaz de monitoreo resultante del equipo apilador. Para dar en la interfaz gráfica una estructura similar a la jerarquía de equipos basados en el rol de ISA-95, los nodos suscriptores clientes MQTT transmiten directamente al espacio determinado en la interfaz gráfica.

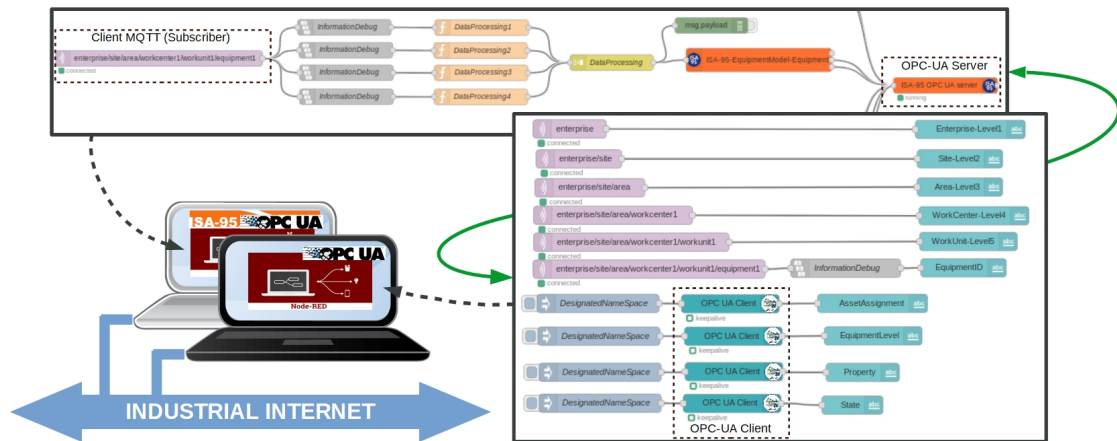


Figura 8. Flujo de mensajes entre nodos de comunicación y de función en NodeRED.

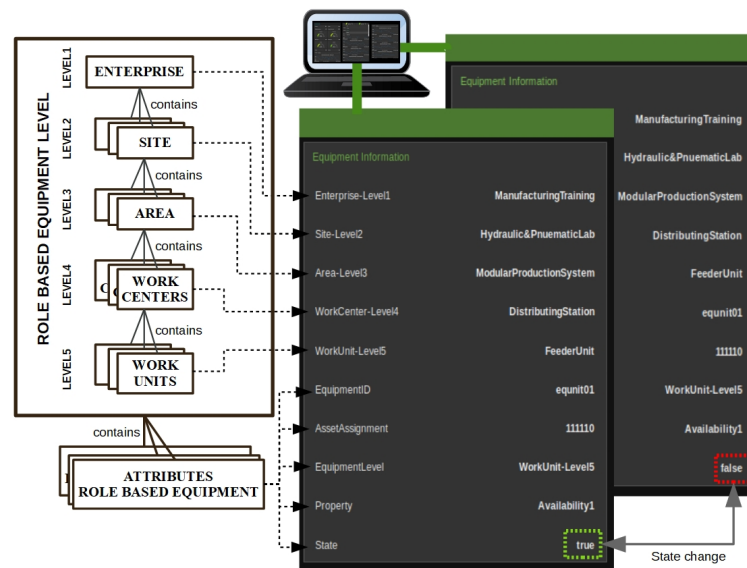


Figura 9. Estructura de la Interfaz gráfica resultante del sistema monitoreo para el equipo.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se presenta una arquitectura de comunicación que permite adquirir los parámetros de los equipos y activos físicos de campo, de manera ágil, encapsulando la información relevante en tipos de FBs, para luego relacionarla de manera eficiente, debido a la estructura común de los tipos de FBs, e intercambiarla de manera más ligera empleando el protocolo de comunicación MQTT soportado por FORTE, sobre una arquitectura de tarjetas inteligentes de bajo coste. El enfoque de la arquitectura permite el crecimiento del sistema desde el nivel de planta, para ampliar la capacidad de cobertura del sistema. La infraestructura del sistema de monitoreo admite la integración fiable en el proceso productivo de aplicaciones de niveles superiores consumidores de información masiva pre procesada, empleando comunicaciones OPC-UA.

Se propone un conjunto de FBs, para almacenar los parámetros de equipos y activos físicos, con interfaces bien definidas, con el fin de obtener una mayor flexibilidad en el diseño de futuras aplicaciones del sistema bajo la norma IEC-61499. La flexibilidad, basado en el flujo de información, permite añadir especificaciones de ISA-95 requeridas sin problemas de direccionamiento, siendo compatible con otros productos de ISA-95.

La estructura de información, basado en ISA-95, que se provee desde NodeRED, reduce la carga de datos a un alto rendimiento de arquitecturas de comunicación en entornos IoT. Por lo que, la arquitectura de comunicación que se presenta, mejora la interoperabilidad entre los componentes del sistema de monitoreo, reduciendo esfuerzos en el intercambio de información y habilitando la comunicación a otras aplicaciones de nivel superior como sistemas MES y ERP.

El sistema de monitoreo resultante, sobre la plataforma NodeRED de IoT, presenta una interfaz refinada con información estructurada en categorías, que facilita la supervisión, en tiempo real, de los parámetros de los equipos y activos físicos, de las estaciones de distribución y clasificación de la planta de entrenamiento de FESTO, integrados de forma distribuida, simulando así, un sistema remoto distribuido de plantas de producción, modeladas según el paradigma de industrias 4.0.

Finalmente se logra implementar un sistema de alcance completo, ayudando a introducir nuevos conceptos de integración y compatibilidad entre estándares actualmente en auge dentro del paradigma de Industria 4.0, así como, IEC-61499, ISA-95, OPC-UA, y MQTT. Futuras investigaciones se centrarán en la integración de diferentes protocolos de comunicación, como AMQP y STOMP, con OPC-UA, para una valoración y un análisis de las características y propiedades de la transmisión de información.

Bibliografía

- Al-Fuqaha, A., Mohsen, G., Mehdi, M., Mohammed, A., & Moussa, A. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communication Surveys & Tutorials (Accepted for Publication)*, 1(2), 78–95. <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2013v1n2p78>
- Alqinsi, P., Matheus, I., Ismail, N., & Darmalaksana, W. (2018). IoT-Based UPS Monitoring System Using MQTT Protocols. *Proceeding of 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICWT.2018.8527815>
- CENELEC, C. (2003). *Function blocks for industrial control systems - Part 1: Architecture (IEC 61499-1:2005)*.
- CENELEC, C. (2014). *IEC 62264-2 (ANSI/ISA-95.00.02 Mod) Enterprise-Control System Integration - Part 2: Object and Attributes for enterprise-control system integration*.
- Fleischmann, H., Kohl, J., Franke, J., Reidt, A., Duchon, M., & Krcmar, H. (2017). Improving maintenance processes with distributed monitoring systems. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, (3), 377–382. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2016.7819189>
- Fysarakis, K., Askoxylakis, I., Soultatos, O., Papaefstathiou, I., Manifavas, C., & Katos, V. (2016). Which IoT Protocol? Comparing Standardized Approaches over a Common M2M Application. *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7842383>

- García, M. V., Irisarri, E., & Pérez, F. (2017). Integración Vertical en plantas industriales utilizando OPC UA e IEC-61499 (Vertical Integration in factories using OPC-UA and IEC-61499). *Enfoque UTE*, 1(1), 287–299. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.132>
- Grgić, K., Špeh, I., & Hedi, I. (2016). A web-based IoT solution for monitoring data using MQTT protocol. *Proceedings of 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies, SST 2016*, 249–253. <https://doi.org/10.1109/SST.2016.7765668>
- Harjunkoski, I., Bauer, R., & Suresh, P. (2014). Sharing data for production scheduling using the ISA-95 standard. *Frontiers in Energy Research*, 2(October), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00044>
- Hästbacka, D., Barna, L., Karaila, M., Liang, Y., Tuominen, P., & Kuikka, S. (2014). Device Status Information Service Architecture for Condition Monitoring Using OPC-UA. *ETFA'2014: 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 1–7.
- Hoffmann, M., Meisen, T., & Jeschke, S. (2017). OPC-UA Based ERP Agents: Enabling Scalable Communication Solutions in Heterogeneous Automation Environments. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, 120–131. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59930-4>
- Hood, G. W. (2015). Industry Standard Models for design / discussion of Manufacturing Systems . *Australian Control Conference (AUCC)*, 5, 12–15.
- ISA-Sp95, M. (2008). *ISA-95 DRAFT STANDARD Enterprise-Control System Integration Part 1 : Models and Terminology*.
- Ismail, A., & Kastner, W. (2016). Vertical integration in industrial enterprises and distributed middleware. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 9(2/3), 79. <https://doi.org/10.1504/IJIPT.2016.079547>
- Janne, H. (2014). *Plant Information Models for Opc Ua: Case Copper Refinery*.
- Keller, M., Rosenberg, M., Brettel, M., & Friederichsen, N. (2014). How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.213>
- Manandhar, S. (2017). *MQTT based communication in IoT*.
- Mishra, A., Kumari, A., Sajit, P., & Pandey, P. (2018). Remote Web Based ECG Monitoring Using MQTT Protocol For IOT In Healthcare. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 5(04), 3–8.
- Mizuya, T., Okuda, M., & Nagao, T. (2017). A Case Study of Data Acquisition from Field Devices Using OPC-UA and MQTT. *SICE Annual Conference*, 1, 611–614.
- Niswar, M., Wainalang, S., Ilham, A. A., Zainuddin, Z., Fujaya, Y., Muslimin, Z., ... Fall, D. (2018). IoT-based water quality monitoring system for soft-shell crab farming.

- Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System, IOTAIS 2018*, 6–9. <https://doi.org/10.1109/IOTAIS.2018.8600828>
- Ono, T., Ali, S., Hunkar, P., & Brandl, D. (2013). *OPC Unified Architecture for ISA-95 Common Object Model*.
- Saturno, M., Ramos, L., Polato, F., Deschamps, F., & de Freitas, E. (2017). Evaluation of Interoperability between Automation Systems using Multi-criteria Methods. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 1837–1845. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.321>
- Trejo-Hernandez, M., & Lopez-Mellado, E. (2013). Specification of manufacturing systems controllers using the standard IEC61499. *23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing, CONIELECOMP 2013*, 23, 179–184. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2013.6525782>
- Vyatkin, V. (2011). IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: State-of-the-art review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 768–781. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166785>
- Wally, B., Huemer, C., & Mazak, A. (2017). Entwining plant engineering data and ERP information: Vertical integration with AutomationML and ISA-95. *International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2017*, 3, 356–364. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942718>
- Wenger, M., Zoitl, A., Blech, J. O., Peake, I., & Fernando, L. (2016). Cloud based monitoring of Timed Events for Industrial Automation. *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Systems - ICPADS*, 827–830. <https://doi.org/10.1109/ICPADS.2015.111>
- Wilamowski, B. M., & Irwin, J. D. (2011). *Industrial Communication Systems*. <https://doi.org/10.1201/b10603>
- Ye, X., & Hong, S. H. (2018). An AutomationML / OPC UA-based Industry 4 . 0 Solution for a Manufacturing System. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1, 543–550. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502637>
- Zoitl, A., & Lewis, R. (2014). *Modelling Distributed Control Systems Using IEC-61499 (2nd Edition)*.
- Zoitl, A., Strasser, T., & Ebenhofer, G. (2013). Developing modular reusable IEC 61499 control applications with 4DIAC. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 11, 358–363. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2013.6622910>
- Zurawski, R. (2007). *Integration Technologies for Industrial Automated Systems (Industrial Information Technology)*.