



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Convergencia entre Tecnologías de  
Operación y Tecnologías de Información  
en Sistemas de Control y Automatización  
Industrial

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Alexis Omar Rodriguez Cruz

ASESOR DE INFORME

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Jurado asignado

Presidente: Mtra. Gloria Correa Palacios

Secretario: M.I. Daniel Martínez Gutiérrez

Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega

1<sup>er</sup> suplente: M.F. Gabriel Hurtado Chong

2<sup>do</sup> suplente: M.A. Luis Yair Bautista Blanco

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio  
de Automatización.

Ciudad de México

Asesor de informe

---

Dr. Hoover Mujica Ortega



## Agradecimientos

A mamá Aida y papá Carlos que desde mi pueblo querido estuvieron siempre para mí. Son mi mayor motivación, los amo.

A mis hermanos, Juan Carlos y Antonio, que fueron como unos padres para mí. Sin ustedes esto no hubiera sido posible. Fueron mi ejemplo a seguir.

A mi abuelito Ernesto, por sus palabras de motivación y sus historias de vida que siempre he disfrutado escuchar. Hombre sabio.

A mi amada Facultad de Ingeniería.

A mi profesor Dr. Hoover Mujica Ortega, al ingeniero Misael y al ingeniero Vélez por darme los ánimos y herramientas para dar este último paso en mi carrera.

A mis tías, tíos, primas y primos que me brindaron su apoyo incondicional. Gracias por acompañarme en todas las etapas de mi preparación profesional.

A mi novia querida y su entrañable familia por compartir mis logros.

## Dedicatoria

*A mamá Aida, papá Carlos y abuelito Ernesto, por ser mi motor.*

*A mis hermanos, Juan Carlos y Antonio, mis mejores aliados.*

## Resumen

En el presente trabajo se describe la evaluación de una arquitectura que da solución a la convergencia entre las tecnologías de operación y las tecnologías de información en empresas que cuentan con sistemas de control y automatización industrial; permitiéndoles disponer de información relevante de piso de planta desde otras instancias dentro de la organización y garantizando la comunicación en tiempo real, integridad del flujo de datos y haciendo una correcta gestión de las capacidades de la red. Este desarrollo surge de la necesidad que tienen las empresas de conocer información de las máquinas, controladores y dispositivos de campo para tomar decisiones oportunas y mantener a la planta con los parámetros óptimos de operación. Además, es preciso mencionar que la evaluación de esta arquitectura forma parte de una iniciativa comercial llevada a cabo por la empresa en donde se realizó este proyecto, para dar a conocer e impulsar sus desarrollos tecnológicos alineados con la Industria 4.0.

La arquitectura implementada está compuesta por un controlador industrial, un variador de frecuencia y una interfaz dedicada. El variador de frecuencia representa el origen de los datos del cual se obtiene información relevante de operación de un eje de movimiento tal como posición, velocidad, valor eficaz de corrientes de estator, voltaje del bus, potencia suministrada, etc. El controlador, por su parte, permite la conexión entre la interfaz dedicada y el variador de frecuencia; y por último, la interfaz dedicada es la encargada de acondicionar la información proveniente de la fuente de datos y dejarla disponible para que las aplicaciones a nivel empresarial la consuman. Para esta solución de convergencia tecnológica desarrollada, el uso de los datos puede consultarse desde tres alternativas: una aplicación en la nube para análisis de datos, una aplicación de internet de las cosas y una base de datos local para el almacenamiento de la información.

El resultado de la evaluación experimental permitió ilustrar y corroborar que es posible disponer de información clave de los procesos de control en plataformas de análisis de datos de forma global, consistente y segura. Con lo cual, se habilita a los profesionales de control de procesos, a tomar decisiones informadas a partir de los datos en tiempo real y a la contextualización dentro del proceso productivo. Esta nueva capacidad, disponible en el contexto de Industria 4.0, constituye una pieza clave para alcanzar los objetivos de sustentabilidad de las industrias.

---

# Contenido

Índice de figuras	VII
Siglas	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Modelo de Redes Ethernet de Planta Convergente . . . . .	5
2.1.1. Características de la solución CPwE . . . . .	6
2.1.1.1. Características industriales . . . . .	7
2.1.1.2. Interconectividad e Interoperabilidad de la red . . . . .	7
2.1.1.3. Comunicación en tiempo real . . . . .	7
2.1.1.4. Disponibilidad de la planta . . . . .	8
2.1.1.5. Seguridad de la infraestructura de comunicación . . . . .	9
2.1.1.6. Manejabilidad de la infraestructura de red . . . . .	9
2.1.1.7. Escalabilidad de la infraestructura de red . . . . .	10
2.2. Modelo de referencia del sistema de control y automatización industrial . .	10
2.2.1. Zona de seguridad . . . . .	10
2.2.2. Zona de celda/área . . . . .	10
2.2.2.1. Nivel 0: Proceso . . . . .	10
2.2.2.2. Nivel 1: Control básico . . . . .	11
2.2.2.3. Nivel 2: Control de supervisión de área . . . . .	11
2.2.3. Zona de producción . . . . .	11
2.2.4. Zona desmilitarizada . . . . .	12
2.2.5. Zona empresarial . . . . .	12
2.2.5.1. Nivel 4: Planificación comercial y logística del sitio . . . .	12
2.2.5.2. Nivel 5: Empresa . . . . .	12
<b>3. Definición del problema</b>	<b>13</b>
3.0.1. Contexto de la participación profesional . . . . .	14

<b>4. Metodología utilizada</b>	<b>15</b>
4.1. Conectividad entre dispositivos a nivel de tecnología operativa . . . . .	15
4.2. Configuración de la interfaz dedicada . . . . .	16
4.2.1. Caso de uso 1: Objetos inteligentes + Emulador de un controlador industrial programable . . . . .	16
4.2.2. Caso de uso 2: Agregar una fuente de datos desde una interfaz de datos directa + Controlador industrial programable y variador de frecuencia . . . . .	17
4.2.2.1. Aplicación en la nube . . . . .	17
4.2.2.2. Aplicación IIoT . . . . .	17
4.2.2.3. Aplicación de servidor SQL . . . . .	18
4.3. Pruebas de integridad en la interfaz dedicada . . . . .	18
4.4. Pruebas de consumo de información por parte de aplicativos a nivel empresarial . . . . .	18
<b>5. Resultados</b>	<b>21</b>
5.1. Aportaciones y resultados . . . . .	21
<b>6. Conclusiones</b>	<b>23</b>
<b>Referencias</b>	<b>25</b>

# Índice de figuras

1.1. Fuente y destinos de datos . . . . .	3
2.1. Responsables empresariales/técnicos: IT frente a los IACS . . . . .	6
2.2. Modelo para la jerarquía de control . . . . .	11
2.3. Dispositivos en la zona de celda/área . . . . .	12
4.1. Infraestructura de red evaluada . . . . .	16
4.2. Configuración requerida en la interfaz dedicada para el caso de uso 1 . . .	17
4.3. Configuración requerida en la interfaz dedicada para el caso de uso 2 . . .	18



# Siglas

**CIP** Common Industrial Protocol. 7

**CPwE** Converged Plantwide Ethernet. 5–10, 15

**CRM** Customer Relationship Management. 12

**DMZ** Demilitarized Zone. 9

**ERP** Enterprise Resources Planning. 12

**HMI** Human Machine Interface. 11

**HSRP** Hot Standby Routing Protocol. 8

**IACS** Industrial Automation and Control Systems. 5–10, 12, 21, 23

**IGMP** Internet Group Management Protocol. 7

**IIoT** Industrial Internet of Things. 1, 17–19, 21

**IoT** Internet of Things. 1

**IP** Internet Protocol. 7, 10, 17

**IT** Information Technology. 1–3, 5, 9, 13–15, 21, 23

**KPI** Key Performance Indicators. 13, 15

**LAN** Local Area Network. 7

**MES** Manufacturing Execution System. 12

**OEE** Overall Equipment Effectiveness. 8, 13

**OSI** Open System Interconnection. 7

**OT** Operational Technology. 1, 3, 5, 13–15, 21, 23

**QoS** Quality of Service. 8

**TCP** Transmission Control Protocol. 7

**UDP** User Datagram Protocol. 7

**VFD** Variable Frequency Drive. 3, 15, 17

**VPN** Virtual Private Network. 12

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años se ha producido el auge de tecnologías relacionadas con las comunicaciones y el control automático, tal como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT, por sus siglas en inglés), como consecuencia de nuevas soluciones, innovadoras e inteligentes encaminadas a la transformación digital, puestas en marcha por parte de las empresas.

Factores significativos como el aumento de la globalización y mercantilización han empujado a las empresas industriales a indagar en nuevos modelos de negocio orientados principalmente a los servicios y aumento de ingresos, así como a reasignar recursos a sus tecnologías y soluciones digitales [Thingworx, 2020].

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), ha permitido la conexión del mundo físico con el virtual. Se ha logrado la unión de equipos, procesos y personas, desde un sensor hasta sistemas complejos. Con la conectividad se ha alcanzado una mejor comprensión de los procesos y ha brindado más información para la toma de decisiones.

La Industria 4.0 se ha convertido en el mercado de más rápido crecimiento para el IoT; y tal y como ha ocurrido en cualquier época de grandes cambios, el camino hacia la transformación digital implica nuevos retos y definir nuevas estrategias. No obstante, según [Thingworx, 2020] las empresas que incorporen el IIoT en sus modelos de negocios descubrirán:

- Eficiencias operativas que ayudan a reducir costos.
- Nuevas fuentes de ingreso.
- Mejoras en el tiempo de comercialización.
- Mejora de las relaciones con los clientes.

Para lograr la conectividad de una empresa es necesaria la convergencia entre la tecnología de operación (OT, por sus siglas en inglés), y la tecnología de información (IT, por sus siglas en inglés) en una única arquitectura, logrando la capitalización de los datos operativos y empresariales para obtener mejoras en el rendimiento de la empresa, las operaciones y la cadena de suministro [Rockwell-Automation, 2020].

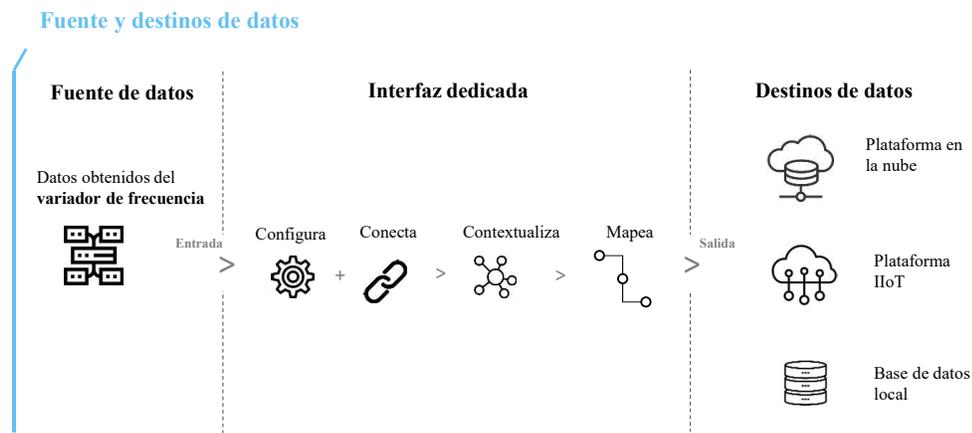
Existen distintas formas de dar solución a la convergencia OT/IT que requieren diferentes conocimientos y recursos. No obstante, la solución implementada y que se documenta en este escrito, no necesita de sistemas complejos en servidores, tampoco una gran cantidad de software especializado. Además, dicha propuesta está pensada para el personal

que está familiarizado con tecnología de operación, sin requerir muchos conocimientos de IT.

## 1.1. Objetivo

Implementación de una solución de convergencia OT/IT mediante el uso de una interfaz dedicada. Dicha interfaz se encarga de configurar, conectar, contextualizar y mapear los datos obtenidos de fuentes industriales (en este caso particular de un variador de frecuencia, VFD, por sus siglas en inglés) para dejarlos disponibles en aplicaciones a nivel IT.

La solución es extrapolable para que las empresas puedan crear modelos de información en la capa de tecnología operativa y asignarlos de manera eficiente a las aplicaciones de IT ascendentes, teniendo así información oportuna para tomar decisiones y mantener a los procesos en los parámetros óptimos de operación. Cabe aclarar que esta solución está pensada para el personal que esté familiarizado en la parte de OT, sin requerir muchos conocimientos de IT.



**Figura 1.1.** Fuente y destinos de datos



# Capítulo 2

## Antecedentes

En el contexto actual, en la industria 4.0, por la necesidad de que los dispositivos estén plenamente conectados, se ha optado desde hace ya unos años por el estándar Ethernet, el cual permite alcanzar mayores grados de complejidad y velocidad en una infraestructura de red. Sin embargo, la incursión de esta tecnología implica el desarrollo de modelos de arquitecturas que permitan la fácil manipulación de datos, así como que se contemplen aspectos de ciberseguridad, escalabilidad y gestión de la red, [Siemens-AG, 2021]. En tal sentido, a continuación se explica el modelo de redes como se sugiere en el contexto industrial, visto desde la perspectiva de convergencia OT/IT.

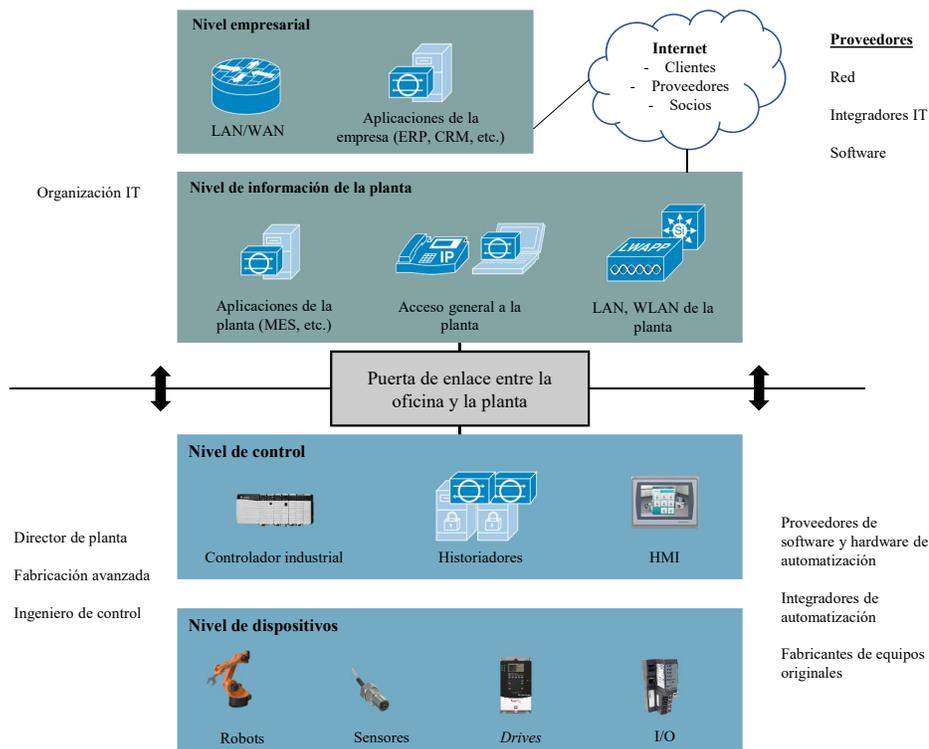
### 2.1. Modelo de Redes Ethernet de Planta Convergente

El Modelo de Redes Ethernet de Planta Convergente (CPwE, por sus siglas en inglés) es una arquitectura que provee de servicios de red estándar a las aplicaciones, dispositivos y equipos que se encuentran en las más actuales aplicaciones de Sistemas de Control y Automatización Industrial (IACS, por sus siglas en inglés), además de integrarlos en la red empresarial [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011]. Con esta arquitectura se consigue la comunicación en tiempo real, así como la fiabilidad y resistencia que requieren los IACS. El modelo CPwE busca proporcionar a los fabricantes la orientación necesaria para afrontar los retos de los IACS totalmente integrados y obtener las ventajas empresariales que ofrece la red estándar.

El departamento de IT colabora cada vez más con los directores de planta e ingenieros de control para aprovechar sus conocimientos y experiencia en tecnologías de red estándar, beneficiando las operaciones de la planta.

La solución CPwE tiene las respuestas a las necesidades tanto del departamento de IT como el de OT, proporcionándoles un modelo común. Cada departamento observa desde diferentes enfoques y tiene diferentes requisitos para una implementación exitosa de CPwE (ver Figura 2.1).

Para el equipo de IT es muy importante comprender los diferentes requisitos de los IACS, así como el campo operativo. En cambio, para los directores de planta y los ingenieros de control, se requiere un mayor conocimiento de las capacidades y el funcionamiento



**Figura 2.1.** Responsables empresariales/técnicos: IT frente a los IACS

de las tecnologías de red estándar. La solución CPwE incorpora diversas referencias de conceptos básicos de las redes para identificar la necesidad de elevar el nivel de conocimiento y experiencia de los responsables técnicos y empresariales.

### 2.1.1. Características de la solución CPwE

Impulsados por una serie de requisitos y características de diseño clave, los entornos de red IACS han evolucionado con el pasar de los años. Estas características no son exclusivas de ethernet industrial, sino de las redes para los IACS en general. A continuación, el modelo CPwE de acuerdo con [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011], define las siguientes características clave que los fabricantes esperan como mejores prácticas:

- Características industriales
- Interconectividad e interoperabilidad
- Comunicación en tiempo real
- Disponibilidad de la planta
- Seguridad de la infraestructura de comunicación

- Capacidad de gestión de la infraestructura de red
- Escalabilidad

#### 2.1.1.1. Características industriales

El modelo CPwE es capaz de superar, a través de su infraestructura, retos espaciales en una red de IACS al soportar una serie de opciones de topología, adaptándose así a las características industriales de los IACS.

La ubicación física de los equipos influye directamente en la topología de las redes de los IACS. A diferencia de como sucede en las redes informáticas, que son en la mayoría con topología de estrella redundante, las redes de los IACS tienen importantes requisitos físicos que propician el uso de topologías como bus, lineal, estrella y anillo. En los espacios de fabricación, los costos de cableado son significativamente más elevados que en oficinas para cumplir con los requerimientos físicos. En muchas ocasiones, las empresas utilizan una combinación de topologías dependiendo de los requerimientos que se le presenten.

#### 2.1.1.2. Interconectividad e Interoperabilidad de la red

Un objetivo clave para las redes de los IACS es la capacidad de interconectar e interoperar una gran cantidad y diferentes tipos de dispositivos y aplicaciones de red IACS a través de una infraestructura de red común. Las tecnologías de red estándar: Ethernet e IP ofrecen la mejor oportunidad para la interconectividad e interoperabilidad, pues permiten a los proveedores de los IACS integrar esto en sus productos sin tantas barreras. El CPwE se centra en el uso de tecnologías de red ethernet e IP estándar para ofrecer la máxima interconectividad e interoperabilidad. Para el caso de la interconectividad, recomienda que los equipos de la red pueden comunicarse haciendo uso de protocolos estándar en las capas 2, 3 y 4 (ethernet, IP y TCP/UDP). Por su parte, la interoperabilidad recomienda que los dispositivos de la red IACS interoperen haciendo uso de protocolos estándar y comunes en la capa 7 (aplicación). Para esto último, CPwE se basa en el uso de CIP como protocolo de capa de aplicación común para interoperar la red IACS y haciendo uso de EtherNet/-Industrial Protocol como red IACS [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011].

Los principales protocolos TCP/IP para esta solución de convergencia se muestra en la Tabla 2.1. El modelo OSI de 7 capas es utilizado para segmentar los distintos protocolos y estándares.

#### 2.1.1.3. Comunicación en tiempo real

La solución CPwE de acuerdo a [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011] toma en cuenta las siguientes consideraciones clave para lograr comunicaciones en tiempo real:

- Número de conmutadores, routers y cantidad de tráfico en la red de capa 2, todo lo cual afecta a la latencia.
- Relación entre los puertos de conmutación de LAN y los puertos de conmutación de enlace ascendente en función de las cargas y los patrones de tráfico.
- Uso del protocolo de gestión de grupos de internet (IGMP, por sus siglas en inglés) para gestionar la entrega eficiente del tráfico de multidifusión.

- Uso de parámetros de calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés) para satisfacer los requisitos en tiempo real de los distintos flujos de tráfico.

**Tabla 2.1.** Protocolos clave TCP/IP [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011]

Capa	Nombre	Función	Protocolo clave
4	Transporte	Comunicación de red confiable entre nodos finales	TCP, UDP
3	Red	Determinación de rutas, enrutamiento	Internet Protocol v4 (IPv4), Internet Group Management Protocol (IGMP), DSCP, OSPF
2	Enlace	Direccionamiento físico, topología de red, notificación de errores, entrega ordenada de tramas y control de flujo	MAC, Ethernet (IEEE802.3), Spanning Tree Protocol, Virtual Local Area Networks (VLAN), Link Aggregation Control Protocol (LACP)
1	Física	Medios, señal y protocolo de transmisión	Ethernet (IEEE802.3) incluyendo Ethernet de 10, 100 Mb y Gigabit en variedades de cobre y fibra

#### 2.1.1.4. Disponibilidad de la planta

La disponibilidad de los IACS está directamente relacionada con el tiempo de actividad de la planta y el OEE de una instalación de fabricación. Tomando en cuenta que la red es un aspecto clave del sistema global, estos requisitos se traducen directamente en la red IACS.

Para la alta disponibilidad, la solución CPwE toma en cuenta las siguientes consideraciones clave de acuerdo con [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011]:

- Para la comunicación de datos, creación de rutas alternativas independientemente de la disposición física (vías redundantes necesarias).
- Eliminar cuellos de botella en las operaciones críticas, incluyendo elementos como fuentes de alimentación dobles, rutas alternativas para medios redundantes, infraestructura de red IACS redundante, como routers, switches y firewalls.
- Uso de técnicas avanzadas de resiliencia y convergencia de red para mejorar la disponibilidad, como EtherChannel, Flex Links y HSRP.
- Funciones y servicios que permiten la rápida sustitución de los dispositivos averiados.

### 2.1.1.5. Seguridad de la infraestructura de comunicación

La conexión de la red de los IACS a una red empresarial, sin lugar a duda la expone a los riesgos de seguridad de internet. De las tres propiedades de seguridad: confidencialidad, integridad y disponibilidad, cuando se habla de IACS, se preocupan principalmente de la disponibilidad y la integridad de los datos. Esto porque muchas de las operaciones de los IACS no pueden detenerse o interrumpirse, pues trae consigo grandes pérdidas económicas. Por otro lado, para las redes empresariales, confidencialidad e integridad son las principales consideraciones de diseño.

Por lo anterior, las arquitecturas de red, las configuraciones de detección de intrusos, configuración de cortafuegos entre otros, necesitan ajustes para soportar aplicaciones de los IACS.

De acuerdo con [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011], los principios de seguridad específicos de la arquitectura CPwE son los siguientes:

- Controlar los flujos de datos entre los diferentes niveles de los IACS.
- Impedir la comunicación directa entre los IACS y las aplicaciones de la empresa.
- Restringir los datos de fabricación en tiempo real a la red IACS.
- Autenticar, autorizar y registrar el acceso de los usuarios en función del perfil dentro de la red.
- Controlar el acceso a los conmutadores y enrutadores dentro de la red IACS.
- Identificar y mitigar el tráfico malicioso procedente de la red empresarial.
- Utilizar opciones de diseño de DMZ basadas en los costes y los niveles de seguridad y redundancia necesarios.
- El inicio de la conexión debe originarse en la zona de fabricación o en la zona de empresa y terminar en la DMZ. Las conexiones que se originan en la DMZ deben ser excepciones.
- Documentar la política y los riesgos apropiados para el entorno.

### 2.1.1.6. Manejabilidad de la infraestructura de red

En una red IACS, la gestión y supervisión es sumamente relevante. Si un trabajador tiene un nivel básico de conocimientos de redes, debe ser capaz de gestionar y supervisar la red. La solución de red de los IACS debe adaptarse de acuerdo con las herramientas, conocimientos y procedimientos existentes por parte del personal de la planta (operadores, ingenieros de control, etc.) sin conocimientos profundos de redes, así como a la capacidad y conocimientos de gestión de redes de nivel empresarial, por parte de los expertos en redes de IT.

### 2.1.1.7. Escalabilidad de la infraestructura de red

Los IACS puede ser de distintos tamaños, desde soluciones de fabricantes de máquinas pequeñas hasta sistemas complejos de plantas muy grandes (por ejemplo, industria automotriz).

En esta versión de la solución CPwE, se enfoca en conceptos básicos, probados en instalaciones típicas de redes pequeñas y medianas.

Según el modelo CPwE de acuerdo con [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011], las consideraciones clave de escalabilidad son las siguientes:

- Costo
- Dimensionamiento de la infraestructura de red, así como limitaciones de rendimiento.
- Clasificación por niveles de la infraestructura de red para cumplir criterios de espacio, tamaño y rendimiento.
- Esquema de direccionamiento IP y asignación
- Consideraciones sobre el mantenimiento y gestión.

## 2.2. Modelo de referencia del sistema de control y automatización industrial

Para comprender los requisitos de los sistemas de seguridad y de red de los IACS, a continuación, se describen las funciones básicas y la composición de un sistema de fabricación. El Modelo Purdue para la Jerarquía de Control (referencia ISBN 1-55617 265-6) es un modelo en la industria manufacturera que segmenta dispositivos y equipos de forma jerárquica (ver Figura 2.2) [Cisco-Systems, 2022].

### 2.2.1. Zona de seguridad

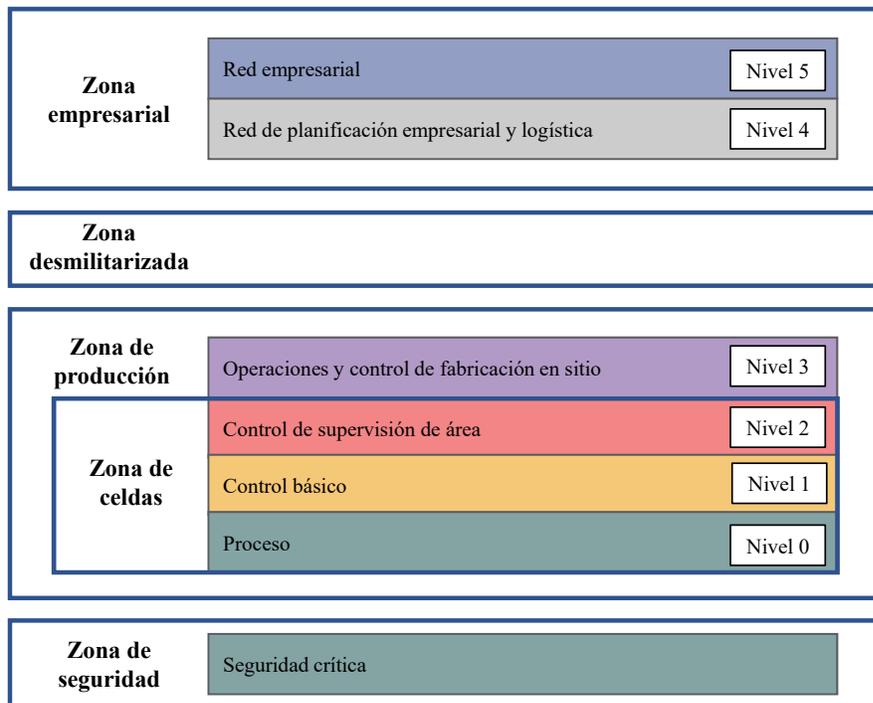
Dispositivos, sensores y otros equipos utilizados para gestionar las funciones de seguridad de los IACS.

### 2.2.2. Zona de celda/área

La zona de celda/área comprende un conjunto de equipos y dispositivos de IACS, controladores, etc., que tienen participación en el control en tiempo real de algún proceso de fabricación. Para el control del proceso, todos están en comunicación entre sí en tiempo real. Esta zona se conforma de tres niveles: proceso, control básico y control de supervisión de área.

#### 2.2.2.1. Nivel 0: Proceso

Nivel donde los dispositivos de campo (sensores, actuadores, etc.) y las máquinas (motores, robots) se comunican con uno o varios controladores.



**Figura 2.2.** Modelo para la jerarquía de control

#### 2.2.2.2. Nivel 1: Control básico

Nivel en el que los controladores multidisciplinares, las HMI dedicadas y otras aplicaciones pueden comunicarse entre sí para ejecutar una parte o todo el sistema de control y automatización (ver Figura 2.3).

#### 2.2.2.3. Nivel 2: Control de supervisión de área

Este nivel representa las aplicaciones y funciones asociadas a la supervisión y funcionamiento de la zona de celda/área. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- Interfaces de operador o HMI
- Alarmas o sistemas de alerta
- Puestos de trabajo de la sala de control

Dependiendo del tamaño o de la estructura de una planta, estas funciones pueden existir en el nivel del sitio (Nivel 3).

### 2.2.3. Zona de producción

La zona de producción está compuesta por las zonas de celda/área (Niveles 0 a 2) y las actividades a nivel de sitio (Nivel 3). La zona de fabricación es relevante porque todas las



**Figura 2.3.** Dispositivos en la zona de celda/área

aplicaciones, dispositivos y controladores IACS críticos para la supervisión y el control de las operaciones IACS de la planta, se encuentran en esta zona. Para preservar la fluidez de las operaciones de la planta y el funcionamiento de las aplicaciones IACS y la red IACS, esta zona requiere una clara segmentación lógica y protección de los niveles 4 y 5 de las operaciones de la planta/empresa.

#### 2.2.4. Zona desmilitarizada

Esta zona proporciona el acondicionamiento y amortiguamiento para que se puedan compartir servicios y datos entre las zonas de operación y de empresa. Adicionalmente, la zona desmilitarizada facilita la segmentación del control organizativo.

#### 2.2.5. Zona empresarial

##### 2.2.5.1. Nivel 4: Planificación comercial y logística del sitio

En este nivel se encuentran los servicios informáticos de las instalaciones de fabricación; esto es, por ejemplo, sistemas de programación, aplicaciones de flujo de materiales, sistemas MES y servicios informáticos locales como seguridad/monitorización.

##### 2.2.5.2. Nivel 5: Empresa

En este nivel existen las aplicaciones de nivel corporativo (ERP y CRM, por ejemplo) y servicios como acceso a internet y punto de entrada a la VPN.

# Capítulo 3

## Definición del problema

En los escenarios de producción de alta velocidad es común que los miembros de las industrias necesiten acceder de manera oportuna al conjunto de datos relacionados con la planta desde varias etapas del proceso, tal como la producción, calidad, rendimiento, etc.

La obtención precisa de los datos de una planta con su sello de tiempo, es fundamental para realizar análisis y generar informes personalizados para la toma de decisiones y optimización de los procesos de producción, pues esto impacta directamente en la competitividad de la empresa. No obstante, la generación de los datos y en consecuencia su disponibilidad, se encuentra a nivel de plata, lo que quiere decir que el personal de OT es el que puede acceder de forma directa a dicha información.

Es de conocimiento común que dentro de un corporativo hay diferentes departamentos que requieren conocer algún tipo de información de la planta. Por ejemplo, si un gerente de operaciones quisiera saber los datos importantes de consumo y desempeño ¿Cómo puede acceder y disponer de esa información? Y no solo basta con disponer de los datos, sino que tiene que estar contextualizada y personalizada para aquel miembro de la empresa (en este caso el gerente de operaciones) que realice la consulta.

Las soluciones para obtener los datos a nivel de piso de planta (como información de sensores, motores, controladores) y llevarlos a un nivel de IT, pueden ser tan diversas y complejas. Sin embargo, en general, dichas soluciones deben de tomar en cuenta las características industriales de su propia planta, la comunicación en tiempo real, la seguridad de las comunicaciones, la capacidad de gestión y la escalabilidad de la red [Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011]. Por otra parte, las tecnologías que las empresas usarán para crear sus aplicaciones y reportes a nivel de IT, dependerá de sus propios requerimientos y recursos.

Tomado en cuenta lo anterior, existe la necesidad de disponer de los datos directos de la planta (mediciones a nivel de proceso) en tiempo real por parte de las distintas áreas y roles de la empresa, para su utilización en la detección de problemas de las máquinas, en la toma precisa de decisiones y en la mejora de los indicadores de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés), como el Overall Equipment Effectiveness (OEE), la calidad predictiva y eficiencia del proceso.

### **3.0.1. Contexto de la participación profesional**

Como parte de una iniciativa comercial para impulsar y dar a conocer los desarrollos tecnológicos de la empresa donde se realizó la actividad profesional, se desarrolló e implementó una solución de convergencia OT/IT. La solución tenía como propósito demostrar, a potenciales clientes, las capacidades de un software propietario (interfaz dedicada) para obtener datos de dispositivos OT y enviarlos a aplicaciones a nivel empresarial.

# Capítulo 4

## Metodología utilizada

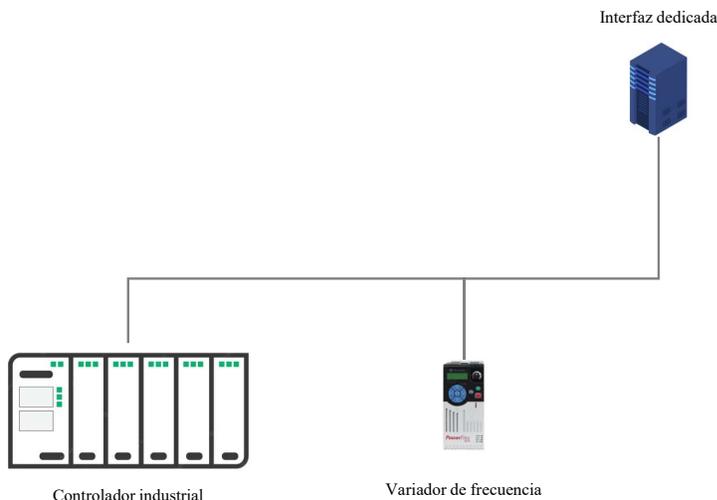
Se ha mencionado que la convergencia OT/IT permite a los usuarios contar con la información oportuna para la toma de decisiones, en aras de que impacte de forma favorable a los KPI de una empresa. Para probar la propuesta de solución de convergencia OT/IT fue necesario realizar un conjunto de configuraciones, pruebas, experimentos y validaciones que me permitieran, en primer lugar, que los dispositivos a nivel de OT se comunicaran, y en niveles ascendentes (IT), asegurar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos.

### 4.1. Conectividad entre dispositivos a nivel de tecnología operativa

La selección y evaluación de una infraestructura de red a escala sirvió de plataforma experimental para probar la propuesta de solución de convergencia. Como se puede apreciar en la Figura 4.1, los dispositivos mínimos necesarios fueron: un VFD, un controlador industrial programable y una interfaz dedicada. El VFD fungió como fuente de datos, es decir, de este dispositivo obtuvimos información como la frecuencia actual del variador, la corriente de salida, el estado mismo del variador (si estaba en falla o no), entre otros datos. Dicha información fue acondicionada en la interfaz dedicada para después dejarla disponible en el último nivel del modelo CPwE. Por su parte, el controlador fue el que permitió la comunicación entre la interfaz dedicada y la fuente de datos.

Para lograr la comunicación entre dispositivos de la Figura 4.1, realicé la conexión del controlador con el VFD y configuré sus direcciones IP y máscara para que estuvieran en la misma red. Gracias al gestor de conexiones del controlador, descargué los parámetros del VFD para tenerlos disponibles dentro del software especializado del controlador.

Para validar la correcta conexión de entre el controlador y el variador, ejecuté la utilidad de diagnóstico, *ping*, permitiéndome conocer el estado, velocidad y calidad de dicha red.



**Figura 4.1.** Infraestructura de red evaluada

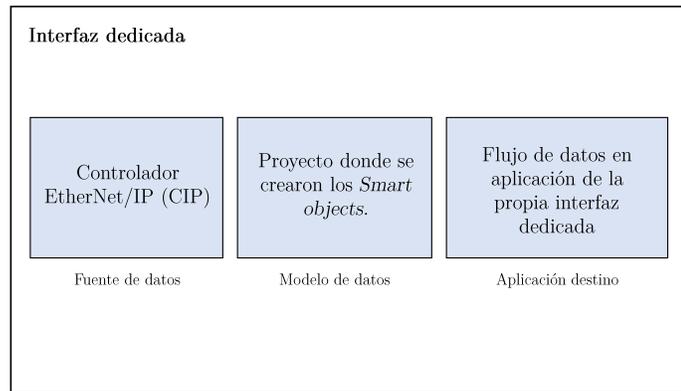
## 4.2. Configuración de la interfaz dedicada

### 4.2.1. Caso de uso 1: Objetos inteligentes + Emulador de un controlador industrial programable

A través del programa especializado del controlador, creé datos de tipo entero, real y *string* y mediante una herramienta de software del propio controlador los convertí a objetos inteligentes. La ventaja de tener objetos inteligentes es que automatiza la preparación de datos, empaquetándolos en un modelo de información común (los datos se agrupan de acuerdo a la relación que tengan entre ellos), por ejemplo, se agrupan por consumo de energía de las máquinas, el estado de los activos, etc. Esto facilita la extracción de atributos relevantes para el análisis.

Para poder agregar los objetos inteligentes a la interfaz dedicada, en dicha interfaz agregué un controlador EtherNet/Industrial Protocol (CIP), recordando que este protocolo es orientado a objetos y proporciona los medios para establecer comunicaciones y acceder a datos y servicios desde dispositivos a través de la red. Como siguiente configuración, se agregó el nombre del proyecto donde se crearon los objetos inteligentes (con su extensión correspondiente). Finalmente, se probó el flujo de datos en una aplicación de prueba que tiene la propia interfaz dedicada. La configuración antes descrita se resume en la Figura 4.2.

La intención de esta etapa fue hacer las primeras pruebas de envío de distintos tipos de datos desde el controlador a la interfaz dedicada; corroborando que los datos se actualizaran con su sello de tiempo sin ningún inconveniente. Para este caso fue más que suficiente hacer las pruebas con el emulador del controlador industrial.



**Figura 4.2.** Configuración requerida en la interfaz dedicada para el caso de uso 1

#### 4.2.2. Caso de uso 2: Agregar una fuente de datos desde una interfaz de datos directa + Controlador industrial programable y variador de frecuencia

Para la arquitectura evaluada, la configuración de la interfaz dedicada fue para que se obtuvieran datos del VFD. En este caso, la recolección de datos no fue mediante objetos inteligentes ni EtherNet/IP, sino mediante una interfaz de acceso directo a la fuente de datos (esta interfaz entrega datos nativos directamente sin necesidad de un intermediario). A diferencia de los objetos inteligentes que ya empaquetan los datos por la relación que tienen, en esta configuración fue necesario crear mis propios modelos (como el acceso es directo, los datos no están estructurados), clasificarlos y organizarlos. Por último configuré el envío de datos a aplicaciones de la nube, IIoT y una base de datos local como se describe a continuación.

##### 4.2.2.1. Aplicación en la nube

Para los usuarios que tienen aplicaciones o soluciones que utilizan aplicaciones en la nube, la interfaz dedicada proporciona un método para recopilar información de fuentes de datos y enviarla al servidor en la nube. La conectividad entre el servidor en la nube y la interfaz dedicada requirió únicamente la cadena de conexión que proporciona la aplicación en la nube (clave única que se comparte entre el que envía y recibe la información).

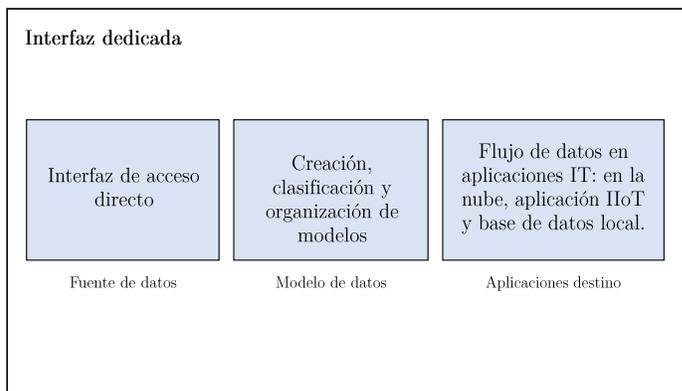
##### 4.2.2.2. Aplicación IIoT

Para los usuarios que tienen aplicaciones o soluciones IIoT, la interfaz dedicada proporciona un método para recopilar información de fuentes de datos y enviarla al servidor de la aplicación IIoT. La configuración en la interfaz dedicada para esta aplicación fue la siguiente: dirección IP de la interfaz dedicada, puerto de enlace y una clave que proporciona el servidor de la aplicación IIoT.

### 4.2.2.3. Aplicación de servidor SQL

Para los usuarios que tienen aplicaciones o soluciones que utilizan base de datos SQL, la interfaz dedicada también proporciona un método para recopilar información de fuentes de datos y enviarla a un servidor SQL. La configuración en la interfaz dedicada para esta aplicación fue la siguiente: nombre del servidor SQL, nombre de la instancia del servidor SQL, puerto SQL, nombre de la tabla y base de datos, y finalmente, las credenciales (nombre de usuario y contraseña) del usuario que podrá acceder a la información.

La configuración para este segundo caso de uso se muestra en la Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Configuración requerida en la interfaz dedicada para el caso de uso 2

## 4.3. Pruebas de integridad en la interfaz dedicada

Para verificar que la información obtenida de los dispositivos de campo no fuera modificada, dentro de la interfaz dedicada se habilitó el flujo de datos y en una aplicación de prueba de la misma interfaz, se mostraron los datos recabados con su sello de tiempo. El sello de tiempo permitió asegurarme que la información efectivamente estaba cambiando e iba de acuerdo con el comportamiento de la fuente de datos.

## 4.4. Pruebas de consumo de información por parte de aplicativos a nivel empresarial

He mencionado que al final, los datos estarían disponibles para diferentes aplicativos a nivel empresarial. Para comprobar, por ejemplo, el consumo de datos para la aplicación en la nube, la aplicación de la nube a través de un gráfico mostraba el consumo de datos que se estaba teniendo. En el caso del aplicativo para IIoT, en su interfaz se visualizaba el cambio de información con su respectivo sello de tiempo. Finalmente, en la aplicación de base de datos local se generaron las tablas de la información que se estaba recibiendo, incluyendo la fecha y hora de última modificación.

Es preciso mencionar que, para lograr la seguridad en las comunicaciones (confidencialidad de los datos), en la interfaz dedicada se establecieron los mecanismos de control de acceso de acuerdo a los requerimientos de cada aplicación consumidora. En el caso de la aplicación de la nube y del IIoT se establecieron llaves de acceso. Para la aplicación de la base de datos local, se especificaron las credenciales del usuario que consumiría la información, así como sus perfiles.



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Aportaciones y resultados

En el proyecto estuve involucrado principalmente en las siguientes actividades: evaluación de la plataforma experimental, implementación de dos casos de uso (con un emulador y un controlador industrial programable físico) para la creación de modelos de información en la capa OT y la configuración del envío de datos a 3 aplicativos a nivel IT. Los resultados los describo a continuación.

La evaluación de la arquitectura fue exitosa; al final, visualizar cómo el flujo de datos en las aplicaciones de IT era consistente con la información que proporcionaba la fuente de datos, aseguró que la solución era confiable. Además, aprovechando los mecanismos de autenticación configurados en la interfaz dedicada para el envío y disponibilidad de los datos, permitió especificar que solo las personas autenticadas y autorizadas pudieran tener acceso a la información.

Para mostrar los resultados se hizo una presentación técnica al equipo de trabajo comentando las principales dificultades encontradas, así como la forma en que se fueron superando. Además, junto con mi equipo realizamos un documento que describía paso a paso las configuraciones de esta solución de convergencia: configuración de controladores para la recabación de la información, creación de modelos de datos, configuración para envío de información a diferentes aplicativos IT, así como las versiones del software en que se desarrolló esta solución. Dicho documento se publicó en las diferentes plataformas de comunicación de la empresa para que los clientes puedan implementarlos en sus sistemas.

Por lo comentado anteriormente, se puede ver que en esta solución se integra una variedad de aplicaciones: en la nube, IIoT, big data; lo que permite aprovechar el tiempo y esfuerzo para maximizar los conocimientos operativos y simplificar la ingesta de datos en una única solución de integración. Con acceso a datos de OT, las aplicaciones de IT pueden ayudar a los usuarios a obtener información sobre los equipos y enfocarse en usar sus datos para detectar y resolver problemas de equipos y así mejorar la producción.

Así, con el cumplimiento del objetivo de este proyecto, se puso al alcance de las empresas con IACS la posibilidad de incorporar soluciones de convergencia OT/IT a sus procesos pues es una solución robusta, probada, validada y replicable; además, reduce la necesidad de conocimientos técnicos de IT.



# Capítulo 6

## Conclusiones

Cada vez que van apareciendo nuevas tecnologías existe la incertidumbre de la funcionalidad y si la implementación será de fácil uso para el personal que labora en una determinada empresa. Con el cumplimiento del objetivo de este proyecto, se pone al alcance de las empresas con IACS la posibilidad de incorporar soluciones de convergencia OT/IT a sus procesos, pues es una solución probada, validada y replicable. Con esta solución, se simplifica y automatiza la recopilación de datos industriales en equipos y dispositivos a nivel de planta, garantiza la integridad de datos, incorpora una variedad de aplicaciones para la consulta de datos a nivel empresarial, flujo de datos en tiempo real y reduce la necesidad de conocimientos técnicos de IT.

Por lo anterior, la disposición de información oportuna y contextualizada permite realizar análisis completos y generar informes personalizados para que las empresas tomen mejores decisiones e impacten de forma favorable en sus métricas de eficiencia.



# Referencias

[Cisco-Systems, 2022] Cisco-Systems (2022). Industrial automation and control reference model. (Citado en página 10.)

[Cisco-Systems y Rockwell-Automation, 2011] Cisco-Systems y Rockwell-Automation (2011). *Converged Plantwide Ethernet (CPwE) Design and Implementation Guide*. (Citado en páginas 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 13.)

[Rockwell-Automation, 2020] Rockwell-Automation (2020). Unlock enterprise level insights from your industrial data. (Citado en página 1.)

[Siemens-AG, 2021] Siemens-AG (2021). Power over ethernet, intelligent connection. (Citado en página 5.)

[Thingworx, 2020] Thingworx (2020). The power of now. (Citado en página 1.)