



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

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

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA DE MONITOREO EN REDES INDUSTRIALES UTILIZANDO
CONVERGENCIA IT/OT CON ARQUITECTURA EDGE-CLOUD**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Programación y Redes

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, Telecomunicaciones y Sistema de
control

AUTOR: Kevin Orlando Moyolema Moyolema

Sharon Nicol Ordóñez Solano

TUTOR: Ing. Víctor Santiago Manzano Villafuerte, Mg.

Ambato - Ecuador

enero - 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO EN REDES INDUSTRIALES UTILIZANDO CONVERGENCIA IT/OT CON ARQUITECTURA EDGE-CLOUD, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por los señores Kevin Orlando Moyolema Moyolema y Sharon Nicol Ordóñez Solano, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que los estudiantes han sido tutorados durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, enero 2026.



Ing. Víctor Santiago Manzano Villafuerte, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE MONITOREO EN REDES INDUSTRIALES UTILIZANDO CONVERGENCIA IT/OT CON ARQUITECTURA EDGE-CLOUD es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2026.



Kevin Orlando Moyolema Moyolema
C.C.1805807748
AUTOR



Sharon Nicol Ordóñez Solano
C.C.0550557078
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizamos su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, enero 2026.



Kevin Orlando Moyolema Moyolema
C.C.1805807748
AUTOR



Sharon Nicol Ordóñez Solano
C.C.0550557078
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

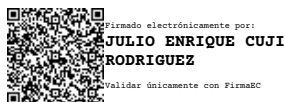
En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por los señores Kevin Orlando Moyolema Moyolema y Sharon Nicol Ordóñez Solano , estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE MONITOREO EN REDES INDUSTRIALES UTILIZANDO CONVERGENCIA IT/OT CON ARQUITECTURA EDGE-CLOUD, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, enero 2026.



Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ing. Julio Enrique Cuji Rodriguez, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

ELIZABETH
PAULINA
AYALA
BANO

Firmado digitalmente por ELIZABETH
PAULINA AYALA BANO
DN: cn=ELIZABETH PAULINA
AYALA BANO c=EC, o=SECURITY
DATA S.A. 2, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicaci.: n
Fecha: 2026-01-06 15:53:05-00

Ing. Paulina Elizabeth Ayala Baño, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios, que me ha otorgado sabiduría y entendimiento, por cuidarme en cada paso y permitirme superar cada desafío con esperanza y fe. Sin su guía, este logro no habría sido posible

A mis padres, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su infinito amor, por guiarme con paciencia y estar presentes en cada etapa de mi vida. Todo lo que soy y lo que he logrado lleva un pedacito de ustedes, porque sin su guía y entrega este camino no habría sido posible.

A mi hermana, por su cariño, apoyo incondicional el cual ha sido un motor que me impulsó a seguir adelante.

A toda mi familia, en especial a mis abuelos: Alfonso (†), Maria Natividad (†), Segundo y Maria Juana, por su ternura, sus enseñanzas y ese apoyo que solo ellos saben dar. Su amor y su ejemplo han sido una luz constante en mi vida, recordándome siempre la importancia de la humildad, la perseverancia.

A mi gran amiga Shani, que me brindo una amistad sincera, por su apoyo incondicional, por sus palabras oportunas a lo largo de la carrera,

Kevin Orlando Moyolema Moyolema

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, punto culminante de mi trayectoria como estudiante, a mi amada madre, Piedad. Ella, la mayor merecedora de cada uno de mis logros, me alentó incluso en mis derrotas, creyó en mí cuando hasta yo misma dudé y fue la roca firme que sostuvo cada paso de mi camino.

A mi pareja, mi querido Antonio, quien desde el inicio de esta travesía ha caminado a mi lado brindándome su amor y apoyo incondicional, acompañando mis desvelos, compartiendo mis miedos y celebrando mis victorias.

A mi mejor amigo, Kevin, quien me ha acompañado a lo largo de la carrera, mi confidente, mi complemento y la persona en la que siempre pude confiar sin reservas. Que no olvide que alguna vez le dije estaría en mi dedicatoria.

A mis apreciados amigos, Mauricio y Klever, quienes entre risas, bromas y compañía sincera iluminaron mi recorrido y me ofrecieron su apoyo.

Y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, estuvieron ahí para mí.

Sharon Ordóñez

AGRADECIMIENTO

A Dios, por concederme la fortaleza, la claridad y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta. Gracias por iluminar mi camino, abrir puertas cuando más lo necesitaba y acompañarme en cada desafío de esta etapa académica.

Agradezco profundamente a mis padres, William y Rocío por estar siempre presentes en mi vida y enseñarme que, aunque la vida está llena de obstáculos, nunca deben ser un motivo para rendirse. Por ser ese ejemplo constante de lucha, esfuerzo y valentía que me ha inspirado a seguir adelante.

A mi hermana Karen, por su cariño sincero y su manera única de darme ánimo cuando más lo necesitaba. Gracias por acompañarme, por celebrar mis logros y por sostenerme en los días difíciles. Tenerte a mi lado ha sido una bendición a lo largo de este camino.

A mi gran amiga, Shani, por su apoyo incondicional, compromiso y por ser una parte significativa en el desarrollo de este trabajo.

A mi tutor de tesis, Ing. Santiago Manzano, por su apoyo y paciencia constante, por confiar en mí y acompañarme con dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Su orientación fue fundamental para alcanzar este objetivo.

Kevin Orlando Moyolema Moyolema

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi madre, Piedad, por su amor incondicional, su apoyo permanente y el incansable esfuerzo que dedicó para que yo pudiera estudiar. Su fortaleza y entrega han sido pilares fundamentales para llegar hasta este momento.

A mi pareja, Antonio, por su compañía en cada etapa del camino, por su ayuda, comprensión y por convertirse en un soporte esencial en la consecución de mis logros académicos.

A mi mejor amigo, Kevin, por su amistad inquebrantable, su apoyo constante y por ser una parte significativa en el desarrollo de este trabajo.

Al tutor de este proyecto, Ing. Santiago Manzano, por su guía, orientación y compromiso a lo largo de todo el proceso. Extiendo también mi agradecimiento a mis docentes, quienes impartieron sus conocimientos con dedicación y responsabilidad durante mi formación.

Finalmente, a mis amigos, por su compañía, su respaldo y por acompañarme en cada paso de esta trayectoria. Agradezco profundamente haber contado con ustedes.

Sharon Ordóñez

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
RESUMEN EJECUTIVO	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	3
1.3 Fundamentación teórica	6

1.3.1 La Revolución tecnológica.....	6
1.3.2 Digitalización del proceso.....	7
1.3.3 Convergencia IT/OT	7
1.3.4 Arquitectura Edge-Cloud	8
1.3.5 Tecnologías habilitadoras de la convergencia IT/OT y Edge-Cloud	19
1.3.6 La transformación digital	22
1.3.7 Industria 4.0	22
1.3.8 Redes Industriales	23
1.3.9 Principales protocolos industriales.....	23
1.3.10 MPS® PA Compact Workstation Overview.....	28
1.3.11 Topología Lógica del Sistema.....	28
1.3.12 Sistemas de Monitoreo Industrial	30
1.4 Objetivos	31
1.4.1 Objetivo general	31
1.4.2 Objetivos específicos	31
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	32
2.1 Materiales.....	32

2.1.1 Sensores industriales del módulo MPS PA	33
2.1.2 PLC S7-1200 (Control Lógico Programable)	34
2.1.3 PC con TIA PORTAL V15.1	35
2.1.4 Equipos Edge	35
2.1.5 Servidor.....	36
2.1.6 Cloud	37
2.1.7 Base de datos – InfluxDB	37
2.1.8 Plataforma de visualización - Grafana	38
2.2 Métodos.....	39
2.2.1 Modalidad de la investigación	39
2.2.2 Población y muestra	40
2.2.3 Recolección de información.....	40
2.2.4 Procesamiento y análisis de datos	41
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
3.1 Desarrollo del proyecto	43
3.2 Gestión parámetros operativos.....	43
3.3 Topología física del sistema.....	44
3.4 Esquema de la arquitectura	45
3.5 Configuración de las capas según el modelo RAMI 4.0	45

3.5.1 Capa de activo	46
3.5.2 Capa de integración.....	47
3.5.3 Capa de Comunicación	49
3.5.4 Capa de Información	50
3.5.5 Capa de función.....	52
3.5.6 Capa de Negocio	55
3.6 Monitoreo de la red industrial	56
3.7 Pruebas de funcionamiento	58
3.7.1 Análisis de Precisión de las Señales de Proceso	60
3.7.2 Prueba de Estrés	64
3.7.3 Recepción de alertas.....	72
3.8 Costos.....	73
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
4.1 Conclusiones	74
4.2 Recomendaciones.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las capas de la Edge-Cloud	10
Tabla 2. Servicios Disponibles por Plataforma en Cada Nivel Edge-Cloud.....	18
Tabla 3. Tecnologías habilitadoras de la convergencia IT/OT y Edge-Cloud.....	20
Tabla 4. Comparativa entres TSDB.	21
Tabla 5. Plataformas de visualización de datos.	22
Tabla 6. Comparativa de los protocolos industriales	27
Tabla 7. Características de los sensores utilizados del módulo MPS PA	34
Tabla 8. Características técnicas del PLC S7-1200 CPU 1214C.....	34
Tabla 9. Raspberry Pi Características.	35
Tabla 10. MikroTik RB951G-2HnD Características.	36
Tabla 11. Características del equipo físico.	36
Tabla 12. Paquetes y servicios necesarios para el despliegue de OpenStack.	37
Tabla 13. Recolección de Información.	41
Tabla 14. Roles y actividades sugeridas para el uso de las herramientas InfluxDB y Grafana.....	56
Tabla 15. Datos obtenidos en las pruebas funcionamiento del sistema.	59
Tabla 16. Comparación entre Señal de Presión y Señal de Voltaje.	61
Tabla 17. Comparación entre Señal de Temperatura y Señal de Voltaje.....	62
Tabla 18. Comparación entre Señal de Nivel y Señal de Voltaje.	63
Tabla 19. Resultados del estrés con 100 sensores.....	68
Tabla 20. Resultados del estrés con 150 sensores.....	68

Tabla 21. Datos obtenidos de Throughput.	71
Tabla 22. Costos.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la Edge–Cloud.	9
Figura 2. Compact Workstation Overview.	28
Figura 3. Sensores industriales utilizados en el módulo MPS PA.	33
Figura 4. PLC S7-1200 CPU 1214C	35
Figura 5. Gestión de Parámetros Operativos.....	44
Figura 6. Topología física del sistema.	44
Figura 7. Esquema de la arquitectura basado en Rami 4.0.	45
Figura 8. Capa de Activo.	47
Figura 9. Capa de Integración.	48
Figura 10. Capa de Comunicación.	50
Figura 11. Capa de Información.....	51
Figura 12. Capa de Función.	53
Figura 13. Despliegue de Openstack.....	54
Figura 14. Capa de Negocio.....	55
Figura 15. Capa de Negocio.....	56
Figura 16. Dashboard en el nodo Edge.	57
Figura 17. Dashboard en la Cloud.	58
Figura 18. Pruebas con variaciones controladas en los sensores.	60
Figura 19. Comparación entre Señal de Presión y Señal de Voltaje.....	61
Figura 20. Comparación entre Señal de Temperatura y Señal de Voltaje.	63

Figura 21. Comparación entre Señal de Nivel y Señal de Voltaje.....	64
Figura 22. Script de envío de datos para generar estrés.....	65
Figura 23. Prueba de estrés con datos de 100 sensores.....	65
Figura 24. Prueba de estrés con datos de 150 sensores.....	68
Figura 25. Comparación de Latencia en el tiempo – 30 min.	69
Figura 26. Prueba de estrés – Throughput	71
Figura 27. Dashboard con el procesamiento de alertas.....	72
Figura 28. Alertas recibidas en Telegram.	72
Figura 29. Layout / MPS-PA Compact Workstation.	85
Figura 30. Analog signals / MPS-PA Compact Workstation.....	86
Figura 31. Programación en el Main PLC1.	87
Figura 32. Normalización y Escalamiento PLC1.....	88
Figura 33. Etiquetas PLC1.	89
Figura 34. Programación en el Main PLC2.	90
Figura 35. Normalización y Escalamiento PLC2.....	91
Figura 36. Etiquetas PLC2.	92
Figura 37. Resumen del estado del servidor Openstack junto con sus instancias.	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Diagrama de conexión MPS-PA	85
Anexo B. Programación en TIA Portal V15.1	87
Anexo C. Monitoreo del Servidor físico	93
Anexo D. Programación para realizar las pruebas de estrés.	93

RESUMEN EJECUTIVO

La implementación de un sistema de monitoreo industrial basado en tecnologías emergentes representa un avance significativo en los procesos de automatización, al integrar de manera eficiente los dispositivos de campo con plataformas de procesamiento y visualización distribuidas. Este progreso se ve impulsado por la convergencia IT/OT, que permite combinar la infraestructura operacional con servicios informáticos avanzados como la Edge-Cloud.

Por ello, este proyecto propone desarrollar un sistema de monitoreo para redes industriales mediante la convergencia IT/OT, la información operativa se captura desde el nivel de campo y se procesa en un nodo Edge que permite reducir latencia, mejorar la disponibilidad y garantizar interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos.

Los datos se envían a una arquitectura Cloud basada en OpenStack, donde se despliegan máquinas virtuales dedicadas a almacenamiento y visualización, utilizando una base de datos (InfluxDB) y paneles de control con Grafana. Esta solución permite obtener historial, tendencias, alertas y análisis centralizado del estado operativo de la red, logrando un monitoreo eficiente, flexible y escalable para entornos industriales modernos.

El sistema fue evaluado mediante pruebas de estrés durante 30 minutos y se determinó que mantiene un desempeño estable con el envío de datos de hasta 100 sensores a la vez, registrando latencias entre 0,1 y 1 ms y una pérdida del 1,05 %. Sin embargo, al aumentar la carga de datos a 150 sensores, la latencia se elevó a un rango de 28 a 72 ms y la pérdida alcanzó el 3,08 %, lo que evidencia que la infraestructura se aproxima a su límite operativo.

Palabras claves: Convergencia IT/OT, Edge Cloud, RAMI 4.0, Snap7, MQTT, OpenStack.

ABSTRACT

The implementation of an industrial monitoring system based on emerging technologies represents a significant advancement in automation processes, as it efficiently integrates field devices with distributed processing and visualization platforms. This progress is driven by IT/OT convergence, which enables the combination of operational infrastructure with advanced computing services such as Edge-Cloud architectures.

Therefore, this project proposes the development of a monitoring system for industrial networks through IT/OT convergence, where operational information is captured at the field level and processed at an Edge node to reduce latency, improve availability, and ensure interoperability among heterogeneous devices.

The data is transmitted to a Cloud architecture based on OpenStack, where virtual machines dedicated to storage and visualization are deployed using a database (InfluxDB) and monitoring dashboards with Grafana. This solution enables the acquisition of historical records, trends, alerts, and centralized analysis of the network's operational state, achieving efficient, flexible, and scalable monitoring for modern industrial environments.

The system was evaluated through stress tests for 30 minutes and was found to maintain stable performance when sending data from up to 100 sensors simultaneously, registering latencies between 0.1 and 1 ms and a loss of 1.05%. However, when the data load was increased to 150 sensors, the latency rose to a range of 28 to 72 ms and the loss reached 3.08%, demonstrating that the infrastructure is approaching its operational limit.

Keywords: IT/OT convergence, Edge-Cloud, RAMI 4.0, Snap7, MQTT, OpenStack.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

“SISTEMA DE MONITOREO EN REDES INDUSTRIALES UTILIZANDO CONVERGENCIA IT/OT CON ARQUITECTURA EDGE-CLOUD”

1.1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, las redes industriales enfrentan limitaciones críticas en escalabilidad y seguridad de grandes volúmenes de datos generados por equipos y sensores distribuidos. Estos entornos requieren sistemas robustos de comunicación que garanticen confiabilidad, baja latencia y disponibilidad continua. Sin embargo, en muchos casos, las redes industriales tradicionales no están preparadas para responder con la agilidad necesaria ante fallas, interrupciones de servicio o la necesidad de mantenimiento predictivo, lo que genera pérdidas económicas, baja productividad y riesgos operativos. Estudio de Kaspersky advierte que los problemas de red en estas compañías ocasionan retrasos, una disminución de los niveles de producción, pérdidas financieras y riesgos para la reputación [1].

Una de cada tres empresas industriales encuentra problemas en la red de forma habitual, y el 45% de los negocios los experimenta varias veces al mes, aunque sólo el 12% de los encuestados afirmó que se enfrenta a este tipo de problemas una vez al año o menos. Estas fueron las conclusiones más preocupantes que Kaspersky destaca en un reciente estudio que investiga los desafíos planteados por la seguridad de las redes y de la información en las empresas que tienen sedes en distintas partes del mundo, también llamadas “geográficamente distribuidas” [1].

Las industrias enfrentan una problemática central: la integración eficiente de las tecnologías de la información (IT) y las tecnologías operativas (OT). Esta convergencia resulta esencial para avanzar hacia modelos de industria 4.0, caracterizados por procesos automatizados, inteligentes y adaptables. Sin embargo, la falta de integración efectiva entre IT y OT constituye una barrera crítica que limita la modernización y competitividad de las operaciones industriales [2].

Una de las principales causas de esta problemática es la fragmentación de la infraestructura tecnológica. Muchos sistemas OT se basan en equipos heredados sin capacidades de conectividad moderna, lo que dificulta su interacción con los sistemas IT actuales. Además, la ausencia de estándares comunes y la baja interoperabilidad entre plataformas y dispositivos impiden una comunicación fluida y segura entre los diferentes componentes del sistema industrial. A este panorama se suma la brecha de conocimiento y coordinación entre los equipos responsables de IT y OT. Frecuentemente, ambos grupos trabajan de forma aislada, con enfoques, lenguajes técnicos y prioridades distintas. La falta de capacitación cruzada y la desalineación de objetivos generan conflictos, retrasos en la toma de decisiones y una gestión ineficiente de los sistemas tecnológicos [2][3].

Otro factor crítico es la limitación en el procesamiento y manejo de datos. Muchas industrias dependen de servicios remotos que introducen retardo en la toma de decisiones, lo cual es especialmente problemático en entornos que requieren respuestas en tiempo real. Además, la creciente cantidad de datos generados por sensores y máquinas supera la capacidad de gestión y análisis de las arquitecturas tradicionales. Estas causas derivan en consecuencias negativas como la ineficiencia operativa, la baja visibilidad del estado real de los procesos industriales, el incremento del tiempo de respuesta ante fallos y riesgos para la continuidad operativa y la seguridad. Asimismo, la falta de integración IT/OT genera desventajas competitivas, dificultando la escalabilidad, automatización y adaptación a nuevas exigencias del mercado, además de limitar la adopción de tecnologías emergentes como IIoT, Edge Cloud o inteligencia artificial [4].

Actualmente alrededor del 10% de los datos generados por las empresas se crean y procesan fuera de un centro de datos o nube tradicional centralizada. En el año 2022, el 50% de los datos se procesarán en el Edge según Gartner. En este sentido, la arquitectura Edge-Cloud emerge como una solución viable para responder a esta necesidad. El modelo Edge-Cloud permite el procesamiento local de los datos generados en planta (edge), reduciendo la latencia y garantizando la continuidad operativa, mientras que sincroniza estos datos con plataformas en la nube (cloud) para su análisis avanzado y almacenamiento masivo. Esta estructura híbrida no solo mejora la escalabilidad de los sistemas, sino que también permite aplicar técnicas

de monitoreo predictivo, automatización inteligente y mantenimiento basado en datos [5][6].

1.2 Antecedentes investigativos

En los últimos años, la integración de tecnologías de la información (IT) con tecnologías de operación (OT) ha dado lugar a soluciones industriales más inteligentes, conectadas y eficientes. A continuación, se presentan proyectos que evidencian cómo la convergencia IT/OT ha sido implementada con éxito en distintos contextos industriales.

En 2022, Daniel Alejandro Lema Aymacaña y Wilson Omar Martínez Erazo, desde la Universidad Politécnica Salesiana en Quito, Ecuador, desarrollaron un sistema de convergencia IT/OT basado en una plataforma en la nube para la automatización de un termotanque en la empresa Ecuapanel. Este sistema integró tecnologías de operación industrial con soluciones de tecnologías de la información, utilizando una arquitectura WNCS (Wireless Network Control Systems) y servicios de AWS (Amazon Web Services) como IoT Core, Timestream y Grafana. La comunicación se estableció mediante el protocolo MQTT, permitiendo la recolección y visualización de métricas en tiempo real. La solución posibilitó el monitoreo y control remoto del estado operativo del termotanque, incluyendo la generación de alertas por fallas simuladas. El sistema se mantuvo operativo de forma estable durante tres meses, con un costo mensual promedio de \$35 y una latencia aproximada de 200 ms. Estos resultados evidencian la viabilidad de implementar arquitecturas IT/OT en la industria local, aprovechando tecnologías en la nube que son accesibles, eficientes y escalables [7].

En el trabajo de Li, Fei y Zhang desarrollado en 2022, en la Universidad de Shenzhen y la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Nanjing, China, se desarrolló un sistema de monitoreo de condición basado en la convergencia IT/OT con una arquitectura Edge-to-Cloud para aplicaciones en entornos de manufactura. El sistema utiliza sensores inteligentes distribuidos que recopilan datos de vibración en máquinas industriales, los cuales son procesados parcialmente en dispositivos Edge mediante la Transformada Wavelet Discreta para calcular la Energía Wavelet Relativa (RWE), y luego enviados a la nube, donde un modelo

LSTM no supervisado realiza la detección de anomalías. Esta integración tecnológica permitió reducir significativamente el tráfico en la red, mejorar la eficiencia del procesamiento de datos y detectar fallas con alta precisión en tiempo real. La solución fue implementada y validada en una máquina insertadora de componentes electrónicos en un entorno de producción real, demostrando su eficacia y estabilidad operativa para estrategias de mantenimiento predictivo en la industria manufacturera [8].

En 2022, Giani, Frank y Verl, en la ciudad de Delft, Países Bajos, analizaron en su artículo las dificultades en la adopción del Control Edge-Cloud (ECC) dentro del ámbito de la automatización industrial. Para ello, entrevistaron a 16 expertos del sector con más de tres años de experiencia en áreas relacionadas con ECC, usando el Modelado Estructural Interpretativo (ISM) y el Análisis de Impacto Cruzado de la Matriz Aplicado a la Clasificación (MICMAC), con la finalidad de construir un modelo estructural que mostrara la interdependencia entre los desafíos identificados. El estudio reveló 11 desafíos agrupados en cuatro categorías principales: Tecnología, Organización, Ingeniería y Estrategia. Los resultados, representados en el diagrama ISM y el gráfico MICMAC, mostraron que los aspectos operativos y de ingeniería del ECC, junto con los factores organizacionales, poseen el mayor nivel de influencia en el sistema. Destacando así, en los niveles superiores 5 y 6 de la jerarquía ISM, la “Separación de departamentos en la fabricación”, la “Brecha entre profesionales de OT e IT” y la “Dependencia de la infraestructura de fábrica” como los retos más críticos. Concluyendo que primero se debe superar las complejidades organizativas y reducir la brecha de conocimiento entre los profesionales de IT y OT para impulsar la adopción del ECC, es decir que es necesario mejorar la usabilidad de las tecnologías Edge-Cloud mediante la reorganización de departamentos y la estandarización de los conceptos de integración [9].

Román-Salinas, en 2024 en la ciudad de México examinaron en su revisión sistemática la creciente relevancia del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y el Edge Computing en el contexto de la Industria 4.0. Para ello, analizaron artículos científicos de bases de datos como EBSCO, MDPI, ScienceDirect e IEEE Xplore, explorando cómo la integración IT/OT, mediante sensores y dispositivos interconectados en equipos industriales, facilita la recopilación de datos en tiempo

real y el monitoreo remoto. Además, resaltaron cómo el Edge Computing emerge como una solución clave al procesar los datos cerca de su fuente de origen, reduciendo la latencia y abordando preocupaciones relacionadas con la privacidad. La revisión concluyó subrayando la importancia de estas tecnologías para optimizar las operaciones industriales, mejorar la eficiencia y habilitar una toma de decisiones más ágil [10].

En el año 2024, Raúl Jair Villón Tomalá, en la Universidad Estatal Península de Santa Elena (Ecuador), desarrolló la tesis titulada “Implementación de un sistema de control y monitoreo IIoT para la adquisición de parámetros eléctricos en un motor trifásico”, la cual representa un avance importante en la digitalización de procesos industriales a través de la integración de tecnologías IT/OT. En su propuesta, implementó un sistema de monitoreo remoto que utilizó dispositivos como un PLC Siemens S7-1200, sensores eléctricos, un variador de frecuencia y una pasarela inteligente SIMATIC IoT2000. Esta pasarela permitió la adquisición y envío de datos a una plataforma en la nube (Insights Hub) utilizando protocolos de comunicación como MODBUS RTU y MQTT. El sistema fue configurado y validado con herramientas como Node-RED y Wireshark, lo que garantizó una transmisión de datos estable, segura y en tiempo real. Como resultado, se logró un monitoreo eficaz de los parámetros eléctricos del motor, mejorando la supervisión operativa, la capacidad de respuesta ante fallos y evidenciando el potencial de las tecnologías IIoT en la optimización de entornos industriales [11].

En el año 2024, Malucín Orquera en su Trabajo de Integración Curricular, se centró en la implementación de un sistema Cloud SCADA para el control y monitoreo de una estación didáctica de lavado y pintura de carrocerías, utilizando la plataforma V-NET. Este proyecto incorporó tecnologías asociadas a la convergencia IT/OT para la adquisición de datos desde un PLC y su transmisión hacia la nube, mediante una pasarela V-BOX de WECON. Aunque el enfoque principal se orientó hacia la implementación de la arquitectura SCADA en la nube, la integración IT/OT actuó como habilitador clave de la conectividad, al permitir la transmisión de datos en tiempo real para el monitoreo y control remoto del sistema. El resultado principal fue un sistema funcional que mejoró el control y la eficiencia operativa de la estación didáctica, evidenciando el potencial de estas tecnologías para entornos educativos e industriales [12].

En el año 2024, Shaji George llevó a cabo el estudio “The Impact of IT/OT Convergence on Digital Transformation in Manufacturing. En su investigación, analizó cómo la integración entre la Tecnología de la Información (IT) y la Tecnología Operativa (OT) fomenta la transformación digital dentro de la manufactura moderna. Para ello, aplicó un enfoque analítico basado en casos de estudio, revisión de datos secundarios y el uso de tecnologías como el IIoT, fog computing, redes inalámbricas y soluciones de ciberseguridad de Cisco, cuyo objetivo fue evaluar el grado de integración entre los sistemas corporativos y los de planta. Como resultado, se demostró que la convergencia IT/OT a posibilitado la toma de decisiones de manera más ágil y en tiempo real, reduciendo la latencia y los costos de operación hasta en un 22 %, además disminuye el tiempo de inactividad no planificado en un 68 %, fortaleciendo al mismo tiempo la seguridad industrial y la eficiencia operativa dentro de los entornos industriales. En conclusión, su estudio evidenció que la implementación de arquitecturas convergentes representa un elemento fundamental para alcanzar la competitividad y sostenibilidad en la Industria 4.0 [13].

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 La Revolución tecnológica

La revolución tecnológica, y esa sensación de cambio cada vez más acelerado, comenzó mucho antes del siglo XVIII y ha continuado hasta la actualidad. Quizás lo más singular de la Revolución Industrial fue la fusión de la tecnología con la industria [14]. Más allá del internet y el uso generalizado de las tecnologías de la información, han emergido nuevas tecnologías que transforman de manera profunda los procesos y actividades en múltiples sectores, modificando los paradigmas de producción y consumo [15]. Es en este contexto, donde el término "Industria 4.0" aparece por primera vez en Alemania en el año 2011, durante la feria tecnológica de Hannover-Messe. Sin embargo, no fue sino hasta la edición de dicha feria en 2013 que se presentó oficialmente la iniciativa por parte del gobierno alemán [16].

1.3.2 Digitalización del proceso

La digitalización del proceso es el traspaso de la información de un formato físico a un entorno digital [17]. Ocurre cuando se están usando en los procesos algunas tecnologías digitales y gestionando datos digitalmente (datos nativos digitales o digitalizados a posteriori) con el fin de convertirlos en procesos más eficientes, más productivos, más rentables y para mayor satisfacción del cliente [18].

La digitalización se centra en el procesamiento de los datos, es decir, no cambia el desarrollo de la organización, sino que permite que avance hacia la transformación digital [17].

1.3.3 Convergencia IT/OT

La innovación digital requiere la integración entre la Tecnología de la Información (TI) y la Tecnología Operativa (TO). Esta conexión permite que sistemas como SCADA y redes industriales interactúen con componentes de TI, como procesadores y almacenamiento. Gracias a esta integración, los datos de equipos físicos e IIoT pueden usarse para optimizar operaciones y resolver problemas. Además, al alinear información de CRM con la experiencia del cliente, es posible mejorar la cadena de suministro, las operaciones y el desarrollo de productos [19].

a. Definición de IT (Tecnologías de la Información)

Las Tecnologías de la Información (IT) son un conjunto de herramientas, infraestructuras y sistemas que se utilizan para procesar, almacenar y transmitir información y datos en formato digital. Abarcan áreas como computación, comunicaciones, software, bases de datos y gestión de información. En la era digital, su alcance se ha ampliado a campos emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), la realidad virtual (VR) y aumentada (AR), impulsando la transformación de sectores como salud, finanzas, transporte y energía [20].

b. Definición de OT (Tecnologías Operacionales)

La Tecnología Operativa (TO) emplea hardware y software para supervisar y controlar procesos físicos, dispositivos e infraestructuras. Es fundamental en sectores con alta utilización de activos, desde el monitoreo de infraestructura crítica hasta el control de robots en fábricas. Se aplica en industrias como manufactura, petróleo y gas, energía, aviación, transporte marítimo y ferroviario, y servicios públicos [19].

c. Aplicaciones de la Convergencia IT/OT

- **Mantenimiento Predictivo:** La integración de IT y OT permite el análisis de datos en tiempo real para predecir fallos en maquinaria, reduciendo tiempos de inactividad y costos de mantenimiento.
- **Optimización de la Producción:** La sincronización de datos entre IT y OT mejora la planificación y ejecución de la producción, aumentando la eficiencia y reduciendo desperdicios.
- **Sostenibilidad:** La convergencia facilita el monitoreo y control de recursos energéticos, promoviendo prácticas más ecológicas y reduciendo la huella de carbono [21].

1.3.4 Arquitectura Edge-Cloud

Edge Cloud es una arquitectura de computación distribuida que acerca los recursos de la nube al borde de la red, es decir, lo más cerca posible del usuario final o del dispositivo que genera los datos, combinando la potencia, flexibilidad y escalabilidad de la nube con la velocidad y eficiencia del edge computing [22].

En la Figura 1 se presenta un mapa conceptual de la Edge-Cloud, en el que se observa con detalle cómo se organiza su arquitectura, los paradigmas y modelos de comunicación que la sustentan, las tecnologías que la hacen posible, las plataformas donde se implementa, así como las áreas de aplicación y las perspectivas y desafíos futuros frente a las nuevas tendencias tecnológicas.

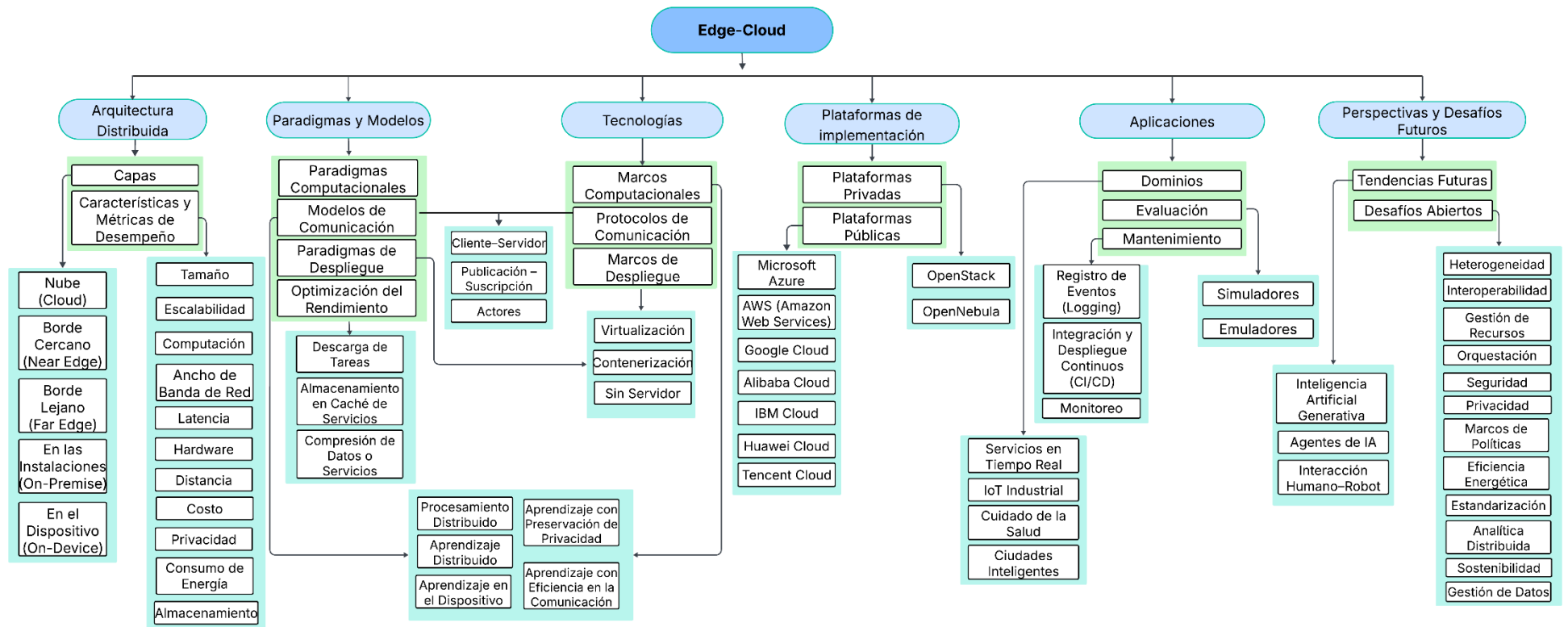


Figura 1. Estructura de la Edge-Cloud [23].

A continuación, se analizarán las características clave la Arquitectura Edge-Cloud:

a. Arquitectura distribuida

Como se observa en la Tabla 1, la Edge-Cloud se organiza en capas jerárquicas, cada una con las siguientes características:

Tabla 1. Características de las capas de la Edge-Cloud [23].

Métrica/Capa	En el dispositivo (On-device)	Local (On-premise)	Borde lejano (Far edge)	Borde cercano (Near edge)	Nube (Cloud)
Tamaño	1M	100k	100-1000	10	<10
Escalabilidad	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Hardware	Dispositivos IoT, cámaras, sensores, teléfonos inteligentes	Pequeños servidores instalados en la proximidad inmediata de las fuentes de datos.	Contenedores físicos o agregadores para cubrir puntos de acceso locales.	Mini centros de datos regionales o dentro del país, para cubrir áreas específicas amplias o concurridas	Centros de datos para cubrir áreas mundiales
Distancia	0	<1km	1-100km	100-1000km	>1000 km
Latencia	<1ms	1ms	2-5ms	10-20ms	>20ms
Ancho de banda de red	Muy bajo (Kbps-Mbps)	Moderado (Mbps)	Moderado a Alto (Mbps-Gbps)	Alto (Gbps)	Muy Alto (Gbps-Tbps)
Capacidades de cómputo	Muy Bajas	Bajas	Medias	Altas	Muy Altas
Capacidades de almacenamiento	Muy Limitadas	Limitadas	Limitadas (solo caché), no aptas para almacenamiento persistente	Medias	Muy Altas (Ilimitadas)
Consumo de energía	<1kW	20-50 kW	30-100kW	0.5-1MW	5-100MW
Tenencia	Dedicada	Dedicada	Multitenencia	Multitenencia	Multitenencia
Privacidad	Muy Alta	Alta	Media-Media	Media-Baja	Baja

b. Paradigmas y modelos

El desarrollo y operación efectiva de aplicaciones distribuidas en el entorno Edge-Cloud depende de modelos y paradigmas que gestionen eficientemente los recursos, el rendimiento y los requerimientos de las aplicaciones. Estos modelos permiten distribuir datos y cómputo entre dispositivos edge, nodos intermedios y plataformas cloud [23].

• *Paradigmas Computacionales*

Las tareas analíticas se distribuyen entre el borde (edge) y la nube (cloud) para mejorar la eficiencia [23].

• *Procesamiento Distribuido*

Se distinguen dos enfoques:

Por lotes (batch processing): Maneja grandes volúmenes de datos históricos, útil para análisis periódicos o reportes centralizados en la nube.

En flujo (stream processing): Procesa datos en tiempo real en el borde, esencial para filtrar sensores, detectar anomalías o generar alertas.

Regularmente se combinan ambos en arquitecturas híbridas para equilibrio entre inmediatez y análisis profundo.

• *Aprendizaje Distribuido*

Permite entrenar modelos de IA de forma colaborativa, tal como:

Paralelismo de datos: Cada cliente entrena el mismo modelo en diferentes particiones de datos.

Paralelismo de modelo: Cada cliente entrena partes diferentes del mismo modelo.

• *Aprendizaje Colaborativo y Preservación de Privacidad*

Federated Learning (FL): Entrenamiento colaborativo sin compartir los datos locales; solo se intercambian parámetros del modelo.

Split Learning (SL): Divide el modelo entre clientes, transmitiendo solo pesos parciales, útil para dispositivos con recursos limitados.

Aprendizaje en el Dispositivo (On-device ML): Los modelos se entrenan y ejecutan directamente en los dispositivos edge, ofreciendo baja latencia, personalización y privacidad. Se apoya en técnicas como TinyML, meta-learning y model compression para superar las limitaciones de cómputo y energía [23].

- ***Modelos de Comunicación***

Definen cómo interactúan los componentes distribuidos entre el edge y la cloud. Se destacan tres modelos principales:

- **Cliente-Servidor:** Los dispositivos edge actúan como clientes que solicitan servicios al cloud. En el continuo Edge-Cloud se añade una capa intermedia (far/near edge) para procesar tareas sensibles a la latencia más cerca del origen de datos.
- **Publicar-Suscribirse (Publish-Subscribe):** Permite comunicación asíncrona entre productores y consumidores de datos, ideal para sistemas IoT distribuidos. Modelos jerárquicos con brokers cercanos al edge reducen latencia y mejoran la escalabilidad.
- **Modelo de Actores (Actor Model):** Los componentes (actores) son entidades independientes que se comunican mediante paso de mensajes. Favorece la concurrencia, tolerancia a fallos y adaptabilidad, muy útil en sistemas fog y edge dinámicos [23].

- ***Paradigmas de Despliegue***

Estos paradigmas definen la forma en que los servicios se organizan, despliegan y ejecutan a lo largo del continuo computacional, permitiendo adaptar el procesamiento a las necesidades del entorno y del sistema. En este contexto, se consideran enfoques tales como la virtualización, la contenerización y la computación sin servidor, los cuales difieren en su nivel de abstracción, aislamiento y gestión de recursos.

- **Virtualización:** Permite ejecutar múltiples aplicaciones en una infraestructura compartida. Las VMs (Máquinas Virtuales) garantizan aislamiento y compatibilidad. Las MicroVMs emergen como una opción más ligera, combinando la seguridad de las VMs con la eficiencia de los contenedores.
- **Contenerización (Containerization):** Los contenedores comparten el núcleo del sistema operativo, reduciendo consumo y tiempos de despliegue. Favorecen la portabilidad, escalabilidad y despliegue dinámico cerca de las fuentes de datos, mejorando la latencia. Se destacan estrategias de consolidación para optimizar recursos y energía.
- **Computación sin Servidor (Serverless):** Permite ejecutar funciones o microtareas sin gestionar infraestructura. Es ideal para cargas de trabajo basadas en eventos y se adapta dinámicamente a las condiciones del entorno (latencia, recursos) [23].

- **Optimización del Rendimiento**

Busca maximizar la eficiencia de recursos y reducir latencia mediante:

- **Descarga de Tareas (Task Offloading):** Traslada tareas pesadas desde dispositivos al edge o la cloud.
- **Estática:** decisiones predefinidas.
- **Dinámica:** decisiones en tiempo real según condiciones del sistema. Se emplean enfoques basados en IA (aprendizaje por refuerzo), heurísticas o teoría de juegos, incluso combinados con blockchain para garantizar seguridad y confianza.
- **Caché de Servicios (Service Caching):** Guarda servicios frecuentemente usados cerca del usuario (por ejemplo, en estaciones base MEC), reduciendo latencia y congestión. Puede ser predictivo (usa ML para anticipar demanda) o colaborativo (cachés coordinados entre edge y cloud).

- **Aprovisionamiento y Compresión de Recursos:** Ajusta dinámicamente los recursos según la carga de trabajo. Además, la compresión de datos en el edge reduce el uso de ancho de banda, aunque debe balancear el tamaño con la precisión analítica [23].

c. Tecnologías habilitadoras

La Edge-Cloud se sustenta en una combinación de frameworks, protocolos y herramientas:

- **Computacionales:** Spark, Flink, TensorFlow, PyTorch, Flower, Edge Impulse.
- **Protocolos de comunicación:** HTTP/3 (QUIC), CoAP, MQTT, DDS.
- **Frameworks de despliegue:** Kubernetes, OpenStack, OpenNebula, KubeEdge.
- **Federated learning y privacidad:** TensorFlow Federated, FATE, PySyft.

d. Plataformas de despliegue

Edge-Cloud se soporta sobre una combinación de plataformas públicas (de proveedores globales) y plataformas privadas (de código abierto) que permiten desplegar, gestionar y ejecutar servicios a lo largo de todo el continuo computacional: near edge, far edge, on-premise y on-device [23].

• Plataformas Públicas

- **Amazon Web Services (AWS):** AWS ofrece una infraestructura híbrida que integra la nube, los entornos locales y el borde (edge) para garantizar baja latencia, residencia de datos y procesamiento local. Sus soluciones permiten acelerar la transformación digital e integrar IT y OT en entornos industriales con conectividad limitada [24].

- Microsoft Azure: Permite extender los servicios de nube al entorno local mediante Azure IoT Edge, facilitando la integración y consolidación de datos operativos dispersos. Esta plataforma posibilita ejecutar y administrar de forma segura cargas de trabajo nativas de la nube directamente en dispositivos IoT. Con ello, se reduce la dependencia del cloud, se optimiza el gasto y se garantiza que los dispositivos respondan rápidamente a cambios locales, manteniendo su funcionamiento confiable incluso sin conexión [25].
- Google Cloud: Ofrece soluciones totalmente gestionadas que lleva la infraestructura y los servicios de Google Cloud al borde de la red, cerca de donde se generan y consumen los datos. Permite ejecutar funciones 5G Core, RAN y aplicaciones empresariales críticas directamente en el edge. Basado en Anthos y las mejores prácticas de seguridad y confiabilidad (SRE) de Google, ofrece una arquitectura abierta que impulsa la colaboración entre proveedores de software, operadores y desarrolladores. Además, integra hardware acelerado Intel y NVIDIA para nuevos casos de uso 5G e industriales, con un control centralizado que facilita la gestión uniforme de entornos distribuidos entre Google Cloud, operadores y clientes [26].
- IBM Cloud: Es una plataforma empresarial enfocada en sectores altamente regulados, que ofrece alta resiliencia, rendimiento, seguridad y cumplimiento normativo. Permite optimizar el despliegue de cargas de trabajo en arquitecturas x86, Power e IBM SaaS, facilitando la integración de entornos híbridos y contenedorizados. Su enfoque híbrido ayuda a las organizaciones a reducir costos hasta un 90 % respecto a infraestructuras tradicionales, al tiempo que proporciona una base segura y flexible para aplicaciones críticas y servicios en la nube [27].
- Alibaba Cloud: Alibaba Cloud es el proveedor exclusivo autorizado por Salesforce para ofrecer sus servicios en China, permitiendo a las empresas locales acceder a la reconocida plataforma CRM que integra marketing, ventas, comercio, servicio al cliente y TI. Las principales soluciones — Sales Cloud, Service Cloud y Platform Cloud— se ofrecen en versiones CN

Unlimited Edition y CN Enterprise Edition, junto con CXG (Customer Experience Gateway), diseñado específicamente para el mercado chino. Esta integración en la nube proporciona soluciones personalizadas para sectores como manufactura, comercio minorista, educación y ciencias de la vida, facilitando la unificación de datos, la automatización de procesos y el análisis predictivo para mejorar la eficiencia operativa, optimizar la experiencia del cliente e impulsar el crecimiento sostenido de los ingresos empresariales [28].

- **Huawei Cloud:** Ofrece una gestión centralizada de aplicaciones en el borde de la red, permitiendo administrar de forma unificada los nodos de computación perimetral distribuidos en distintas áreas. Su plataforma facilita el despliegue, configuración, actualización, monitoreo y mantenimiento de grandes volúmenes de aplicaciones, optimizando la eficiencia operativa y el control en entornos Edge distribuidos. Además, Huawei CloudEdge es una solución de banda ancha móvil (MBB) de nueva generación basada en virtualización de funciones de red (NFV), arquitectura orientada a servicios (SOA) y tecnología en la nube, compuesta por CloudEPC, CloudMSE y CloudUIC, los cuales integran datos de múltiples modos de acceso radioeléctrico (RAT). Esta solución optimiza el software de aplicación de soporte para ofrecer ventajas como despliegue automático, escalado elástico y alto rendimiento, garantizando niveles de disponibilidad y operación de nivel operador, y asegurando además su evolución hacia las redes 5G [29].
- **Tencent Cloud:** Ofrece una amplia gama de servicios y soluciones basadas en la nube, como computación, almacenamiento, bases de datos, redes, seguridad e inteligencia artificial, con una infraestructura escalable y flexible que facilita el despliegue y la gestión de aplicaciones. Su modelo de pago por uso permite a las empresas optimizar costos según sus necesidades. Entre sus características destacadas se incluyen el cómputo de alto rendimiento, la implementación multirregional con centros de datos distribuidos globalmente, avanzadas capacidades de seguridad y cumplimiento normativo, servicios de IA y big data (como aprendizaje

automático y análisis de datos), y un conjunto de herramientas y APIs para desarrolladores que agilizan la creación y gestión de aplicaciones [30].

- ***Plataformas Privadas (Open Source)***

- OpenStack: Es una plataforma de tecnología open source que permite diseñar y gestionar nubes privadas y públicas a partir de recursos virtuales agrupados. Está compuesta por múltiples proyectos o módulos, cada uno encargado de servicios esenciales de cloud computing como cómputo, redes, almacenamiento, gestión de identidades e imágenes, además de otros proyectos opcionales que permiten crear entornos personalizados. A través de la virtualización, OpenStack abstrae recursos como CPU, RAM y almacenamiento mediante un hipervisor, distribuyéndolos de forma dinámica con un conjunto unificado de API. Aunque comparte similitudes con las plataformas de gestión de virtualización, OpenStack va más allá: utiliza los recursos virtualizados para crear entornos de nube completos que cumplen con los cinco principios del cloud computing definidos por el NIST —red de acceso, recursos agrupados, autoservicio bajo demanda, rápida elasticidad y medición del servicio—, consolidándose como una solución integral para la construcción y administración de infraestructuras en la nube [31].
- OpenNebula: Es una plataforma open source de Cloud y Edge Computing diseñada para gestionar infraestructuras privadas, híbridas o de borde de manera sencilla y potente. Su objetivo es unificar la simplicidad y agilidad de la nube pública con el rendimiento, la seguridad y el control de la nube privada. Ofrece una arquitectura abierta que permite orquestar recursos de cómputo, almacenamiento y red mediante software, garantizando flexibilidad, escalabilidad y autonomía frente a proveedores. Además, facilita la automatización de operaciones y la gestión de máquinas virtuales y clústeres de Kubernetes en un entorno compartido, integrando la administración de nubes privadas, públicas y de borde bajo un único panel de control e infraestructura interoperable [32]

En la Tabla 2 se muestra qué servicios específicos ofrece cada plataforma en cada nivel de la arquitectura Edge-Cloud.

Tabla 2. Servicios Disponibles por Plataforma en Cada Nivel Edge-Cloud [23].

Capa	AWS	Azure	Google Cloud	IBM Cloud	Alibaba Cloud	Huawei Cloud	Tencent Cloud	OpenStack	OpenNebula
Near Edge	AWS Local Zones / Snowball Edge	Azure Private MEC	Google Distributed Cloud Edge	IBM Edge App. Manager	Link IoT Edge / Edge Nodes	IEF / Huawei MEC	EdgeOne (CDN)	StarlingX	OpenNebula Edge
Far Edge	AWS Wavelength / Snowcone	Azure Edge Zones	Google Distributed Cloud Edge	IBM Edge App. Manager	Link IoT Edge	IEF / EdgeGallery	EdgeOne (MEC)	StarlingX	Extensiones ONEedge5G
On-Premise	AWS Outposts	Azure Stack Edge / HCI	Google Distributed Cloud Hosted / Anthos on-prem	IBM Cloud Satellite	Apsara Stack	Cloud Stack / FusionCube	TCE	OpenStack	OpenNebula Private Cloud
On-Device	AWS IoT Greengrass / IoT Core	Azure IoT Edge	Coral Edge TPU	—	Link IoT Platform / SDK	LiteOS / IoT SDK	IoT Explorer / SDK	StarlingX (limitado)	—

e. Aplicaciones

- Smart Cities: transporte, monitoreo ambiental.
- Healthcare: diagnóstico en tiempo real, monitoreo remoto.
- Industrial IoT / Industry 4.0: mantenimiento predictivo, control y monitoreo local.
- Real-Time Services: gaming, AR/VR, vehículos autónomos.
- Incluye además herramientas para simulación, pruebas y CI/CD (emuladores, testbeds).

f. Desafíos y tendencias futuras

- Estandarización e interoperabilidad: Falta de estándares comunes entre proveedores y capas.
- Orquestación automatizada multi-nube: Necesidad de controladores capaces de gestionar cargas dinámicas multi-cloud.
- Seguridad, privacidad: Riesgos de ataques en entornos distribuidos; necesidad de encriptación end-to-end.
- Eficiencia energética y sostenibilidad: Alto consumo de energía en data centers y nodos edge.
- Integración con IA generativa y agentes inteligentes:
- Integración de IA generativa y agentes inteligentes para toma de decisiones local.

1.3.5 Tecnologías habilitadoras de la convergencia IT/OT y Edge-Cloud

Para realizar la convergencia IT/OT y Edge cloud, se requieren tecnologías que permitan la integración eficiente de dispositivos, sensores y sistemas en la arquitectura Edge-Cloud, facilitando la interoperabilidad y la escalabilidad de las soluciones industriales, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tecnologías habilitadoras de la convergencia IT/OT y Edge-Cloud [33]-[37].

Categoría	Tecnologías Clave	Función en la Convergencia IT/OT	Beneficio Principal
Edge/Fog Computing	Docker, K3s, OpenNebula, OpenStack Edge	Procesamiento local y orquestación distribuida	Baja latencia y autonomía operacional
TSN y redes deterministas	IEEE 802.1Qbv/Qbu, VLANs, PTP	Transporte de tráfico crítico y convergente	Determinismo y sincronización
Middleware interoperable	OPC UA, MQTT, Kafka	Comunicación estandarizada entre OT y IT	Interoperabilidad y escalabilidad
Gateways industriales	Protocol translation, Edge security	Puente entre campo industrial y nube	Integración y ciberseguridad
Redes industriales convergentes	Ethernet TSN, SDN, NFV, 5G Industrial	Backbone común IT/OT	Monitoreo unificado y control eficiente

De igual forma, se debe contar con plataformas especializadas para el almacenamiento, análisis y visualización de datos operacionales.

- Bases de datos de series temporales (TSDB): diseñadas para almacenar y procesar eficientemente datos que varían en función del tiempo, gestionando las características únicas de estos datos con el fin de obtener una rápida ingestión y análisis de los mismos. En la Tabla 4 se observa una comparación entre diferentes TSDB [38].

Tabla 4. Comparativa entres TSDB [39]-[42].

Característica	InfluxDB	TimescaleDB	OpenTSDB	Prometheus
Tipo de motor	TSDB nativa	Extensión sobre PostgreSQL	TSDB sobre HBase/Hadoop	TSDB embebida con motor de scraping
Lenguaje de consultas	Flux InfluxQL	SQL estándar + funciones TS	Consultas vía API, CLI	PromQL
Arquitectura	Single node / Cluster (enterprise)	Relacional + time-series	Distribuida, cluster masivo	Single node con federación
Escalabilidad	Media-Alta	Alta	Muy alta (escala horizontal real)	Media (pensado para scraping continuo)
Integraciones nativas	MQTT, Telegraf, Grafana	Grafana, PostgreSQL ecosistema	Hadoop, HBase, Grafana	Kubernetes, Alertmanager, Grafana
Rendimiento de escritura	Muy alto	Alto	Altísimo en cluster	Muy alto a corto plazo
Retención de datos	Retention policies	Tables + hypertables	Data TTL en HBase	Retention per metric (no ideal histórico)
Ventaja principal	Simplicidad + ecosistema completo	SQL con time-series real	Escalabilidad industrial masiva	Observabilidad en sistemas distribuidos
Desventaja principal	Analítica compleja limitada	Mayor consumo de recursos	Requiere cluster Hadoop/HBase	No sirve para históricos largos
Nivel de complejidad	Bajo	Medio	Muy alto	Medio

- Plataformas de visualización: Son herramientas que permiten representar de forma gráfica los datos operativos más relevantes, con la posibilidad de modificarlos en tiempo real para facilitar su interpretación y apoyar la toma de decisiones. Su principal objetivo es proporcionar información útil y oportuna que permita definir las acciones a seguir en los siguientes pasos [43]. Algunos ejemplos de estas plataformas se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Plataformas de visualización de datos [44]-[47].

Característica	Grafana	Power BI	Kibana	Ignition Perspective
Tipo de plataforma	Visualización de datos en tiempo real y monitoreo	Analítica de negocio y reporting	Análisis de logs y monitoreo	HMI/SCADA web para Industria 4.0
Soporte para tiempo real	Alto	Medio	Alto	Muy alto
Integración con bases de datos TSDB	Excelente (InfluxDB, TimescaleDB, VictoriaMetrics, Prometheus)	Limitado (requiere gateways o conectores)	Buena (Elastic TSDB, Beats)	Buena (OPC UA + SQL + Historian interno)
Integración MQTT	Sí, mediante plugins	No nativo	Sí mediante Logstash	Nativo
Visualización web	Sí	Sí	Sí	Sí (nativo móvil y web responsivo)
Alertas	Sí	Sí	Sí	Sí
Licenciamiento	Open source + Enterprise	Propietario	Open source + Enterprise	Propietario
Curva de aprendizaje	Baja	Media	Media-Alta	Media

1.3.6 La transformación digital

La transformación digital de la industria se basa en la integración de tecnologías disruptivas como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data, Cloud Computing y la Ciberseguridad. Estas herramientas son clave en el desarrollo de la Cuarta Revolución Industrial, cuyo objetivo es crear fábricas inteligentes mediante sistemas ciberfísicos que combinan elementos físicos y virtuales. En sus orígenes, esta revolución se basa en la interconexión y colaboración de máquinas inteligentes y sistemas conectados, sentando las bases para una producción altamente eficiente y adaptable [16].

1.3.7 Industria 4.0

La Industria 4.0 se define esencialmente como la digitalización avanzada de los sistemas y procesos industriales, lograda a través de una interconexión profunda mediada por el Internet de las Cosas (IoT) y el Internet de los Servicios (IoS). El propósito central de esta transformación es alcanzar una mayor flexibilidad y una individualización sin precedentes en los procesos productivos [16].

1.3.8 Redes Industriales

a. Definición y evolución

Las redes industriales son estructuras de comunicación automatizada que gestionan procesos industriales que involucran actuadores, computadoras, máquinas, sensores, interfaces, radios de comunicación, fibra óptica, redes inalámbricas industriales y robots [48].

La evolución de las redes industriales comenzó con la automatización básica y la conexión de dispositivos mediante buses de campo y protocolos propietarios. Con el tiempo, la necesidad de mayor integración y flexibilidad impulsó la adopción de estándares abiertos y la incorporación de tecnologías como Ethernet industrial, permitiendo la interoperabilidad entre sistemas de diferentes fabricantes. Actualmente, en la era de la Industria 4.0, las redes industriales integran tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y el análisis de datos, facilitando la comunicación entre máquinas, procesos y personas, así como la toma de decisiones basada en información en tiempo real [49].

b. Tipos de redes industriales

Las redes industriales se clasifican según el nivel en el que operan dentro de una arquitectura de automatización. Entre los principales tipos se encuentran [48], [50]:

- **Redes de campo:** Conectan sensores, actuadores y dispositivos de campo con los controladores.
- **Redes de control:** Interconectan los controladores con sistemas de supervisión.
- **Redes de información:** Integran sistemas de gestión, oficina y planta con los sistemas de control y campo.

1.3.9 Principales protocolos industriales

En el mundo de la automatización industrial, los protocolos de automatización industrial son la base de la comunicación entre dispositivos en entornos industriales

modernos, ya que facilitan el intercambio fluido de datos entre una amplia gama de equipos como PLC, sensores, variadores de frecuencia, paneles HMI, robots y sistemas SCADA. En este contexto, los protocolos de comunicación actúan como el puente que conecta equipos, sistemas y aplicaciones, permitiendo que funcionen de manera integrada y eficiente mediante la estandarización del intercambio de información, lo cual garantiza la interoperabilidad, el control y el monitoreo de los procesos. La comunicación industrial implica enviar información de un punto a otro para que sea procesada, almacenada o utilizada según sea necesario, pero su complejidad radica en la necesidad de transmitir datos de forma segura, rápida y confiable, incluso en ambientes con ruido eléctrico o condiciones extremas. Por ello, la correcta selección e implementación de los protocolos es crucial para optimizar el rendimiento y la eficiencia de cualquier sistema industrial [51].

En el contexto de las redes industriales modernas, la comunicación eficiente y confiable entre dispositivos, controladores y sistemas de supervisión es esencial para garantizar la automatización, el monitoreo y el control de procesos [52].

Entre los protocolos industriales más utilizados en la actualidad, que destacan por su capacidad de optimizar la comunicación entre dispositivos, garantizar la interoperabilidad, mejorar la escalabilidad de los sistemas y aportar flexibilidad en la gestión de redes industriales, se encuentran:

a. Modbus TCP/IP

Modbus es un protocolo de comunicación abierto ampliamente utilizado en entornos industriales para el intercambio de información entre dispositivos electrónicos. Su arquitectura maestro-esclavo permite que un dispositivo maestro solicite y reciba datos de múltiples esclavos, cada uno con una dirección única dentro de la red. Este protocolo puede operar mediante interfaces RS-232, RS-485 o RS-422, lo que lo hace adaptable a diferentes configuraciones de comunicación. Su simplicidad, bajo costo de integración y amplia compatibilidad con equipos industriales han contribuido a que sea uno de los estándares más populares para la supervisión y control de sensores, actuadores y sistemas SCADA, aunque presenta limitaciones en la velocidad de transmisión y en el manejo de estructuras de datos complejas [51], [53].

Modbus TCP/IP surge como una extensión moderna de Modbus RTU, diseñada para funcionar sobre redes Ethernet, lo que incrementa notablemente la velocidad y el alcance de la comunicación. Este protocolo es ideal para entornos industriales que requieren transmisión de datos de alta velocidad entre múltiples dispositivos a través de redes locales (LAN), ofreciendo además escalabilidad y compatibilidad con infraestructuras industriales modernas. Gracias a su capacidad para admitir numerosos dispositivos y su integración con servidores en serie, garantiza una transferencia de datos confiable y eficiente. Por estas razones, Modbus TCP/IP se considera una opción óptima para sistemas que demandan comunicación rápida y estable bajo el entorno Ethernet industrial [53].

b. PROFINET

Profinet es un potente protocolo Ethernet industrial ampliamente utilizado en la automatización de fábricas y el control de procesos, que ofrece una comunicación rápida, fiable y en tiempo real para el intercambio de datos entre dispositivos industriales. Destaca por su conectividad de alta velocidad, su compatibilidad con sistemas de control avanzados y el amplio soporte que recibe de Siemens y otros fabricantes líderes del sector. A diferencia de Modbus TCP/IP, que se emplea principalmente para comunicaciones industriales básicas, Profinet proporciona funciones más robustas orientadas a la automatización de alto rendimiento y al control preciso en tiempo real, lo que lo convierte en una solución preferida en entornos industriales exigentes [54].

c. OPC UA

OPC UA es un protocolo de comunicación independiente de la plataforma, basado en estándares abiertos, que permite el intercambio seguro y confiable de información entre sistemas de automatización industrial y aplicaciones empresariales. Su diseño orientado a objetos facilita una interoperabilidad avanzada entre equipos y software de diferentes fabricantes, mientras que su seguridad se garantiza mediante mecanismos de cifrado y autenticación. Estas características lo convierten en una herramienta clave para la Industria 4.0 y las aplicaciones IoT en tiempo real. No obstante, su implementación puede ser más compleja que la de otros protocolos y requiere una infraestructura tecnológica moderna. OPC UA se utiliza principalmente para la integración de sistemas

industriales y de tecnologías de la información, promoviendo la conectividad y la gestión eficiente de datos a lo largo de toda la cadena productiva [51].

d. Protocolo S7Comm

El protocolo S7Comm (Siemens S7 Communication Protocol) es el mecanismo de comunicación propietario desarrollado por Siemens para el intercambio de datos entre los controladores lógicos programables (PLC) SIMATIC S7 y otros dispositivos o sistemas externos dentro de una red industrial basada en PROFINET (Ethernet Industrial). Este protocolo permite la transmisión de información en tiempo real entre el PLC, las interfaces HMI, las estaciones de ingeniería y los sistemas de supervisión o análisis, garantizando la integridad y sincronización de los datos del proceso.

En el entorno de desarrollo Step 7, integrado dentro del TIA Portal, el protocolo S7Comm es utilizado de forma nativa para establecer la comunicación entre el software de ingeniería y el PLC. A través de este protocolo, Step 7 permite descargar programas, monitorear variables, realizar pruebas en línea y ejecutar tareas de diagnóstico. Por tanto, aunque comúnmente se asocia Step 7 con la comunicación del sistema, Step 7 no constituye un protocolo en sí mismo, sino el entorno de ingeniería que emplea S7Comm para la transferencia de información entre el PC y el PLC [55].

e. STEP 7

STEP 7 es el entorno de ingeniería desarrollado por Siemens para la programación, configuración y diagnóstico de los controladores lógicos programables (PLC) de la familia SIMATIC S7. Este software constituye una herramienta esencial dentro de los sistemas de automatización industrial, ya que permite diseñar, implementar y mantener la lógica de control que gobierna los procesos productivos. Su estructura modular y compatibilidad con los estándares internacionales de programación industrial (IEC 61131-3) garantizan la flexibilidad y reutilización del código en entornos industriales complejos.

A través de STEP 7, el usuario puede realizar la configuración del hardware, asignar direcciones de entrada y salida, crear bloques funcionales, gestionar datos y ejecutar tareas de diagnóstico y monitoreo del sistema. Además, su integración

con herramientas como SIMATIC Manager y TIA Portal facilita el desarrollo de arquitecturas distribuidas y la comunicación entre distintos niveles de automatización (OT, IT y Cloud). Gracias a estas capacidades, STEP 7 se posiciona como un componente clave en la transición hacia entornos inteligentes y conectados propios de la Industria 4.0 [55].

f. Comparativa de los principales protocolos industriales

A continuación, la Tabla 6 muestra la comparativa de los principales protocolos industriales.

Tabla 6. Comparativa de los protocolos industriales [51]-[55].

Característica	Modbus TCP/IP	PROFINET	OPC UA	SCOM 7 (S7 Communication / Snap7)
Tipo de comunicación	Maestro-esclavo (Cliente-Servidor)	Cíclica y acíclica (Tiempo Real)	Cliente-Servidor / Pub-Sub	Cliente-Servidor
Velocidad de transmisión	Hasta 100 Mbps	100 Mbps – 1 Gbps	Depende del transporte	100 Mbps
Determinismo / Tiempo real	Limitado (no determinístico)	Alto (RT e IRT)	Medio (depende de implementación y transporte)	Bajo-medio
Interoperabilidad	Media (varía según fabricante)	Alta en ecosistema Siemens	Muy alta (independiente del fabricante)	Media (PLC Siemens S7-300/400/1200/1500)
Seguridad	Básica (sin cifrado nativo)	Integrada (Conformance Class C, VLAN, autenticación)	Cifrado, firma digital, autenticación	Depende de la aplicación
Aplicaciones típicas	Automatización básica, monitoreo remoto	Control de procesos, automatización avanzada	Integración IT/OT, nube, analítica, SCADA avanzado	Lectura de datos del PLC desde aplicaciones externas (Node-RED, Python, SCADA), pruebas y diagnóstico
Ventajas principales	Sencillo, universal y ampliamente adoptado	Alta velocidad, robusto y orientado a industria	Estándar abierto, interoperable, seguro y escalable	Fácil acceso a memoria del PLC, muy rápido para lectura directa, ideal para Edge Computing

Estos protocolos son la base de la conectividad industrial moderna, permitiendo una transición efectiva hacia entornos de la Industria 4.0 mediante la integración entre el mundo operativo (OT) y el mundo de la tecnología de la información (IT) [52].

1.3.10 MPS® PA Compact Workstation Overview

MPS PA es una estación de trabajo compacta de instrumentación de procesos la cual está equipada con sensores parametrizables los cuales permiten familiarizarse con las funciones de los dispositivos de control típicos, tal como se observa en la Figura 2 [56].



Figura 2. Compact Workstation Overview [56].

Los cuatro lazos de control de proceso de la estación de trabajo compacta MPS PA pueden operarse individualmente. Mediante el controlador correspondiente, el sistema de control de nivel y caudal puede configurarse como un sistema de control en cascada. El diseño de los sensores y actuadores de válvulas permite el uso de controladores tanto continuos (p. ej., P, I, PI, PID) como discontinuos (p. ej., controladores de 2 puntos) [57].

1.3.11 Topología Lógica del Sistema

La topología lógica del sistema se estructura siguiendo una arquitectura distribuida que integra los niveles OT, Edge, IT y Cloud, permitiendo una comunicación fluida y progresiva entre los sistemas de control industrial y las plataformas de gestión de

información. Esta organización garantiza la adquisición, procesamiento y análisis eficiente de los datos generados en el proceso productivo, contribuyendo a la toma de decisiones basadas en información en tiempo real [58].

- **Nivel OT:** conformado por sensores y actuadores de campo encargados de la adquisición de variables físicas del proceso.
- **Nivel Edge:** compuesto por gateways, brokers y dispositivos de borde responsables del preprocesamiento de datos y la conexión con niveles superiores.
- **Nivel IT:** abarca servidores locales que gestionan bases de datos, historiales y aplicaciones de supervisión.
- **Nivel Cloud:** incluye servicios en la nube destinados al almacenamiento masivo, análisis avanzado y visualización de información a través de *dashboards* y herramientas analíticas.

a. Topología Lógica del Sistema basada en el modelo RAMI 4.0

La topología del sistema se organiza también conforme al modelo de referencia RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industry 4.0), el cual proporciona una estructura tridimensional para representar de manera integral los aspectos funcionales, jerárquicos y del ciclo de vida de los sistemas industriales. Este modelo permite la interoperabilidad entre los componentes físicos y digitales, garantizando la integración vertical y horizontal de los datos dentro del entorno industrial [59].

- **Capa de Activo:** sensores y actuadores que capturan variables físicas y ejecutan acciones en el proceso.
- **Capa de Integración:** controladores lógicos programables (PLC) y *gateways* que traducen y procesan las señales provenientes del nivel de campo.
- **Capa de Comunicación:** *brokers* MQTT y dispositivos de borde que habilitan el intercambio estandarizado y seguro de información.

- **Capa de Información:** servidores y sistemas locales que gestionan, almacenan y analizan los datos de planta.
- **Capa de Función:** nodos de cómputo y aplicaciones industriales que ejecutan algoritmos de control avanzado y optimización operativa.
- **Capa de Negocio:** plataformas en la nube y paneles de visualización que permiten el análisis estratégico, la toma de decisiones y la supervisión global del sistema.

1.3.12 Sistemas de Monitoreo Industrial

El monitoreo industrial es el proceso de supervisar y controlar los procesos productivos en tiempo real, mediante la recopilación, visualización y análisis de datos provenientes de máquinas, sensores y sistemas de control. Su objetivo principal es obtener una visión detallada y actualizada del funcionamiento de la planta, facilitando la toma de decisiones informadas y la detección temprana de problemas o desviaciones en los procesos. Esto permite optimizar el rendimiento, la eficiencia y la seguridad de las operaciones, además de reducir costos y tiempos de inactividad [60].

A continuación, se describen algunos de los principales tipos de monitoreo utilizados en la industria:

Monitoreo en tiempo real: El monitoreo en tiempo real es la supervisión y detección de problemas en los sistemas informáticos y redes de una organización justo en el momento en que ocurren. Este tipo de software se encarga de recolectar y analizar datos al instante, lo que brinda a los equipos de TI la capacidad de identificar y resolver cualquier incidente antes de que escalen y se conviertan en inconvenientes mayores [61].

Monitoreo predictivo: Utiliza tecnologías avanzadas como sensores IoT e inteligencia artificial para analizar tendencias y patrones de comportamiento de los equipos, anticipando fallas antes de que ocurran. Esto posibilita el mantenimiento proactivo y reduce los tiempos de parada no planificados [62].

Monitoreo remoto: Permite supervisar y gestionar los procesos industriales desde cualquier ubicación, gracias a soluciones basadas en la nube y conectividad IoT. Facilita la colaboración entre equipos distribuidos y la escalabilidad de los sistemas de monitoreo [63].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo en redes industriales utilizando convergencia IT/OT con arquitectura Edge-Cloud.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los requisitos técnicos y conceptuales necesarios para la integración efectiva de las tecnologías IT/OT en redes industriales.
- Diseñar una arquitectura IT y OT basada en Edge-Cloud, permitiendo la interoperabilidad y el procesamiento eficiente de datos.
- Desarrollar un sistema de adquisición, transmisión y visualización de datos que permita monitorear el estado y los parámetros operativos de una red industrial.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En el contexto de la investigación desarrollada, este proyecto se enfocó en el modelo Rami 4.0 para la organización por capas, la arquitectura propuesta permite la adquisición, transmisión y visualización integral de variables industriales provenientes de sensores de nivel, temperatura y presión. Para la medición de estas variables, se empleó los sensores Liquicap T FMI21, Thermophant T TTR31 y Ceraphant T PTC31, todos ellos instalados dentro del módulo MPS-PA. Las señales generadas por estos dispositivos no se entregan directamente al PLC, sino que son procesadas previamente por los módulos de acondicionamiento y conversión analógica incorporados en el propio MPS-PA, encargados de transformar la salida del sensor en una señal analógica estandarizada dentro del rango de 0 a 10 V. Estas señales son procesadas por dos controladores lógicos programables Siemens S7-1200, encargados de convertir las magnitudes físicas en datos digitales aptos para su tratamiento posterior dentro del sistema.

La capa de comunicación primaria ocupó un dispositivo Mikrotik RB951G-2HnD, que actuó como pasarela de red para el envío seguro y eficiente de los datos adquiridos hacia un nodo perimetral. En este punto, una Raspberry Pi cumplió la función de servidor de borde (Edge), ejecutando la plataforma Node-RED, donde los datos provenientes de los PLCs son recibidos, procesados y organizados en flujos estructurados. Posteriormente, esta información se publicó mediante el protocolo MQTT, estableciendo un canal de comunicación liviano y confiable para su envío hacia la infraestructura en la nube privada.

El procesamiento central se realizó en un entorno virtualizado dentro de un servidor físico ejecutando OpenStack, compuesto por los nodos de control, cómputo y red, que permiten desplegar máquinas virtuales dedicadas a la gestión y almacenamiento de datos. En este entorno, los valores transmitidos por MQTT son almacenados en una base de datos de series temporales InfluxDB, optimizada para manejar información continua proveniente de sensores industriales. Finalmente, la visualización y monitoreo en tiempo real se llevó a cabo mediante un panel

diseñado en Grafana, donde se analizó el comportamiento de las variables del proceso y evaluó el desempeño del sistema de adquisición.

2.1.1 Sensores industriales del módulo MPS PA

Dentro del módulo MPS PA se encuentran los dispositivos de campo utilizados en el sistema, destinados a medir variables fundamentales del proceso: presión, temperatura y nivel, tal como se observa en la Figura 3. Estos elementos forman parte integral de la estación de instrumentación del MPS PA ya que garantiza la adquisición confiable de datos y el comportamiento adecuado del sistema durante las actividades experimentales.

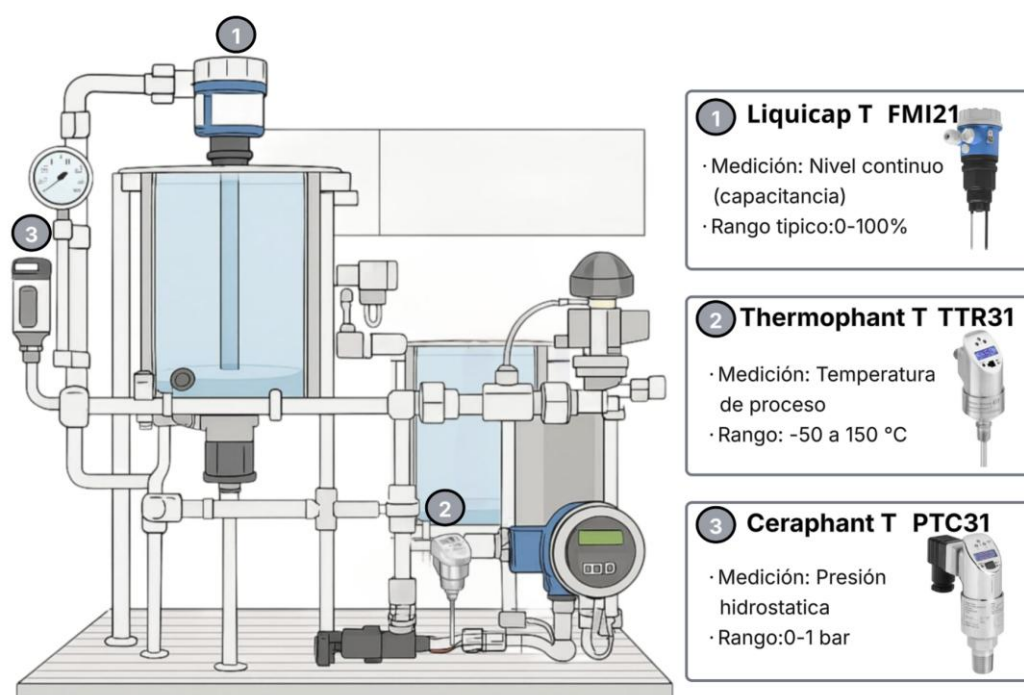


Figura 3. Sensores industriales utilizados en el módulo MPS PA.

Estos instrumentos, diseñados para aplicaciones industriales, proporcionan mediciones confiables, estables y precisas, lo que garantiza la calidad de los datos adquiridos y asegura un funcionamiento adecuado del sistema de control. En la Tabla 7, se presentan las principales características técnicas de los sensores empleados en la red industrial.

Tabla 7. Características de los sensores utilizados del módulo MPS PA [64]-[66].

Sensor	Principio de medición	Datos técnicos principales	Precisión / Repetibilidad	Ficha técnica / Datasheet
Liquicap T FMI21	Capacitivo (sonda de varilla)	Líquidos conductivos ($\geq 30 \mu\text{S/cm}$)	Alta repetibilidad ($\pm 2...5 \text{ mm}$ según rango)	Liquicap T FMI21
Thermophant T TTR31	Elemento electrónico + switch	$-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150...200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (según versión)	Precisión típica: $\pm 0.2...0.5 \%$ (según elemento)	Thermophant T TTR31
Ceraphant T PTC31	Célula cerámica	Desde vacío hasta alta presión (según modelo)	Exactitud típica: $\pm 0.3 \%$	Ceraphant T PTC31

2.1.2 PLC S7-1200 (Control Lógico Programable)

Un PLC es un dispositivo inteligente que sirve para automatizar cualquier proceso industrial, utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones y ejecutarlas según la disposición de sensores/actuadores del proceso y utiliza varios lenguajes de programación comprensibles para el usuario.

Para el desarrollo del sistema de control se empleó un PLC Siemens SIMATIC S7-1200, específicamente el modelo CPU 1214C DC/DC/DC, seleccionado por su capacidad de procesamiento y su compatibilidad con aplicaciones de automatización industrial a pequeña y mediana escala. Este controlador integra entradas y salidas digitales, así como canales analógicos destinados a la adquisición de señales provenientes de los sensores de campo. En la Tabla 8 se describen sus principales características técnicas y en la Figura 4 se observa el modelo del PLC [67].

Tabla 8. Características técnicas del PLC S7-1200 CPU 1214C [67].

Característica	Descripción
Modelo	Siemens SIMATIC S7-1200 – CPU 1214C DC/DC/DC
Tipo de familia	Controlador modular serie S7-1200
Alimentación	24 VDC
Corriente nominal	$\sim 600 \text{ mA}$
Entradas digitales (DI)	14 entradas digitales, 24 VDC, 6 mA por punto
Salidas digitales (DO)	10 salidas transistor (sourcing), 2 A por canal
Entradas analógicas (AI)	2 entradas analógicas 0–10 V
Aplicación típica	Automatización industrial de pequeña y mediana escala



Figura 4. PLC S7-1200 CPU 1214C [67].

2.1.3 PC con TIA PORTAL V15.1

Para el desarrollo de la propuesta empleó una computadora del investigador con el software TIA Portal. A través del entorno de desarrollo, se programó y configuró el PLC Siemens S7-1200, estableciendo la estructura de adquisición de datos proveniente de los sensores y a su vez la comunicación con los niveles superiores del sistema.

2.1.4 Equipos Edge

La infraestructura del proyecto está conformada por dispositivos que actúan como puente entre la red industrial y la red IT, garantizando un procesamiento eficiente y una comunicación confiable de los datos obtenidos en los niveles operativos.

Entre los equipos implementados se encuentra una Raspberry Pi, configurada como Broker MQTT, cumpliendo la función de procesamiento intermedio y pasarela de comunicación, sus características principales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Raspberry Pi Características.

Parámetro	Especificación
Modelo	Raspberry Pi 5
Procesador	Quad-Core ARM Cortex-A76 a 2.4 GHz
Memoria RAM	4 GB
Almacenamiento	Tarjeta externa microSD
Conectividad	Ethernet Gigabit 10/100/1000 Mbps y Wi-Fi 802.11ac
Sistema operativo	Raspberry Pi OS (basado en Debian)
Consumo energético	Bajo

De manera complementaria, se incorporó un MikroTik RB951G-2HnD, que actúa como enrutador y switch de borde, facilitando la interconexión entre la red industrial y la red IT, sus características principales se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. MikroTik RB951G-2HnD Características.

Parámetro	Especificación
Modelo	MikroTik RB951G-2HnD
Procesador	Atheros AR9344 a 600 MHz
Memoria RAM	128 MB
Puertos Ethernet	5 puertos Gigabit Ethernet
Interfaz inalámbrica	Wi-Fi 802.11b/g/n (2.4 GHz) con antena integrada
Sistema operativo	RouterOS
Servicios soportados	Enrutamiento avanzado, cortafuegos, VPN, QoS

2.1.5 Servidor

Para el servidor físico se empleó una computadora del investigador, donde se instaló VMware Workstation Pro, un software de virtualización que permite ejecutar múltiples sistemas operativos sobre un mismo equipo. De esta manera, se implementaron máquinas virtuales utilizando CentOS Stream 9 como sistema operativo principal para los servicios del proyecto. A continuación, se presenta la Tabla 11 con las características principales del servidor.

Tabla 11. Características del equipo físico.

Parámetro	Especificación
Tipo de equipo	Laptop Lenovo
Sistema operativo base	Windows 11 Pro
Procesador	12th Gen Intel® Core™ i7-1255U (1.70 GHz)
Memoria RAM	24 GB DDR5
Almacenamiento	SSD de 1 TB
Software de virtualización	VMware Workstation Pro
Sistema operativo invitado	CentOS Stream 9

2.1.6 Cloud

Se utilizó la plataforma OpenStack como solución de nube privada, permitiendo desplegar y gestionar infraestructura como servicio (IaaS).

La instalación de OpenStack se configuró en modalidad multinodo, distribuida en tres máquinas virtuales:

- Nodo de control.
- Nodo de cómputo.
- Nodo de red.

En la Tabla 12 se observan los paquetes y servicios necesarios para el despliegue de OpenStack en modalidad multinodo:

Tabla 12. Paquetes y servicios necesarios para el despliegue de OpenStack.

Nodo control	<ul style="list-style-type: none">• MariaDB: base de datos para almacenar la configuración de los servicios de OpenStack.• RabbitMQ: sistema de mensajería para la comunicación entre los servicios.• Memcached: caché distribuida para mejorar el rendimiento de la autenticación y servicios.• Keystone: servicio de identidad y autenticación.• Glance: gestión de imágenes de máquinas virtuales.• Placement: asignación de recursos (CPU, RAM, almacenamiento).• Nova (API y Scheduler): gestión de máquinas virtuales.• Neutron (Server): servicio de redes virtuales.• Horizon: dashboard web para la administración gráfica.
Nodo de Red	<ul style="list-style-type: none">• Neutron (L3, DHCP y agentes de metering): para crear routers virtuales, asignar direcciones IP y gestionar reglas de red.• Open vSwitch (OVS) o Linux Bridge: implementación de redes virtuales.
Nodo de Cómputo	<ul style="list-style-type: none">• Nova-compute: encargado de crear y gestionar las máquinas virtuales.• Neutron agent (OVS o Linux Bridge): integración de las VMs con la red virtual.• Libvirt/QEMU-KVM: hipervisor para la ejecución de instancias.

2.1.7 Base de datos – InfluxDB

InfluxDB es una base de datos de series temporales (TSDB) de código abierto, diseñada para manejar grandes volúmenes de datos que cambian con el tiempo,

cuenta con almacenamiento rápido, alta disponibilidad y recuperación de datos de series temporales [68], motivo por el cual se la usó en la instancia de almacenamiento de la nube.

Características principales:

- Almacén de datos personalizado de alto rendimiento escrito específicamente para datos de series temporales.
- El motor TSM permite una alta velocidad de ingesta y compresión de datos
- API HTTP de escritura y consulta simples y de alto rendimiento.
- Los complementos son compatibles con otros protocolos de ingesta de datos como Graphite, collectd y OpenTSDB.
- Lenguaje de consulta expresivo similar a SQL adaptado para consultar fácilmente datos agregados.
- Las etiquetas permiten indexar series para consultas rápidas y eficientes.
- Las políticas de retención caducan automáticamente de manera eficiente los datos obsoletos.
- Las consultas continuas calculan automáticamente los datos agregados para que las consultas frecuentes sean más eficientes.

2.1.8 Plataforma de visualización - Grafana

Grafana es una herramienta de interfaz de usuario de código abierto, centralizada en la obtención de datos a partir de consultas, como también del almacenamiento de estos y su visualización con ayuda de paneles de control personalizables [69], razón por la cual se eligió como dashboard dentro del proyecto.

Características principales:

- Se conecta con bases de datos como Graphite, Prometheus, Influx DB, Elasticsearch, MySQL, PostgreSQL, y otros.

- Es una solución de código abierto. Permite escribir complementos desde cero para su integración con varias fuentes de datos diferentes.
- La herramienta ayuda a estudiar, analizar y monitorear datos durante un período de tiempo.
- Puede ser implementado localmente por organizaciones que no desean que sus datos se transmitan a un proveedor de nube por razones de seguridad y otras. Tiene un modelo híbrido entre nube privada y pública.
- Contiene una gama de opciones de visualización.
- Un tablero contiene varios paneles individuales diferentes en la cuadrícula. Cada panel tiene diferentes funcionalidades.
- Permite consultar, visualizar, configurar alertas y comprender los datos fácilmente con la ayuda de métricas.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

Para el desarrollo del presente Trabajo de Titulación se empleó tres modalidades de investigación que se complementan entre sí para alcanzar los objetivos planteados.

En primer lugar, se utilizó la investigación bibliográfica documental, sirviendo como base teórica y conceptual del proyecto. Esta modalidad permitió recopilar, analizar y sistematizar información técnica proveniente de libros, artículos científicos, normas técnicas, documentación de fabricantes y reportes especializados. El propósito fue comprender en profundidad los fundamentos de la convergencia IT/OT, las arquitecturas Edge y Cloud, y los protocolos de comunicación industrial más utilizados en la actualidad. Esta fase teórica permitió contextualizar el estado del arte y establecer los lineamientos para el diseño del sistema de monitoreo.

Posteriormente, se aplicó la investigación aplicada, enfocada en el diseño y desarrollo de una solución práctica que atienda una necesidad concreta en el contexto de las redes industriales modernas. A partir del conocimiento adquirido en la fase documental, se propuso un sistema de monitoreo que integre tecnologías IT y OT bajo una arquitectura Edge-Cloud, permitiendo la captura, procesamiento y envío de datos desde dispositivos en campo hacia plataformas de análisis en la nube. Esta modalidad tuvo como finalidad generar una solución funcional y adaptada a escenarios reales de la industria.

Finalmente, se desarrolló la investigación experimental, mediante la implementación de un prototipo del sistema propuesto en un entorno controlado. Se utilizaron dispositivos reales como sensores industriales, PLCs y servidor Edge, junto con servicios en la nube para evaluar la operatividad del sistema. Esta fase permitió validar el desempeño del sistema bajo parámetros como latencia, precisión e interoperabilidad. Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con los objetivos esperados, permitiendo realizar ajustes o mejoras en el diseño inicial.

2.2.2 Población y muestra

En el presente proyecto no se considera necesaria la definición de una población ni la selección de una muestra, ya que la investigación no se centra en el análisis de datos provenientes de sujetos humanos, encuestas o estudios sociales. En su lugar, el enfoque está dirigido al diseño, implementación y validación técnica de un sistema de monitoreo en redes industriales, utilizando dispositivos electrónicos, protocolos de comunicación y arquitecturas tecnológicas. Por lo tanto, la unidad de análisis está constituida por los componentes tecnológicos del sistema y su comportamiento en condiciones de laboratorio, más que por variables demográficas o poblacionales.

2.2.3 Recolección de información

Con el objetivo de establecer un sistema de monitoreo eficiente en redes industriales, se ha definido una estrategia metodológica que detalla los elementos clave del proceso de recolección de información. Esta planificación considera los fines del estudio, los actores y dispositivos involucrados, los métodos de obtención

de datos, los recursos necesarios, el cronograma de trabajo y el entorno en el que se desarrollará el proyecto. Se presenta la descripción estructurada de cada uno de estos criterios fundamentales para el desarrollo de la investigación en la Tabla 13.

Tabla 13. Recolección de Información.

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Obtener información técnica y experimental que permita analizar la integración de tecnologías IT/OT, diseñar una arquitectura funcional Edge-Cloud y desarrollar un sistema de monitoreo en redes industriales basado en protocolos estandarizados.
¿De qué personas u objetos?	Mediante dispositivos industriales como sensores, PLCs, equipos Edge y plataformas Cloud, utilizados en el desarrollo y prueba del sistema de monitoreo.
¿Cómo?	A través de pruebas de adquisición y transmisión de datos operativos, registro y análisis de datos operativos en condiciones controladas.
¿Con qué?	Por medio de fichas técnicas, hojas de datos, documentación de protocolos e instrumentos como PLCs y sensores industriales.
¿Cuándo?	Durante el periodo académico agosto 2025 – enero 2026 donde se desarrollará mediante las siguientes etapas del proyecto: Inicio del proyecto: revisión bibliográfica y recopilación de fichas técnicas. Fase de diseño e integración: pruebas de interoperabilidad, comunicación y adquisición de datos. Implementación y monitoreo: validación de visualización, conexión y transmisión de datos operativos. Fase final: evaluación de resultados, ajustes al sistema y verificación de funcionamiento continuo.
¿Dónde?	En los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial (FISEI) de la Universidad Técnica de Ambato.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

Los datos recopilados fueron procesados mediante las siguientes etapas:

- Análisis teórico: Se identificó patrones y conceptos clave en la documentación técnica, bibliografía especializada y estándares industriales, con énfasis en niveles de interoperabilidad, protocolos y modelos de integración IT/OT en entornos Edge-Cloud.

- Análisis comparativo de tecnologías: Se evaluaron las similitudes y diferencias en el uso de plataformas de adquisición, transmisión y visualización de datos.
- Evaluación del rendimiento y la interoperabilidad: Se procesaron los datos obtenidos de sensores industriales para validar el correcto funcionamiento del sistema, midiendo parámetros como latencia y precisión.
- Síntesis técnica: Se elaboró un informe técnico que resume los hallazgos obtenidos en el proceso, identificando oportunidades, desafíos y recomendaciones para la implementación efectiva de una arquitectura Edge-Cloud en entornos industriales.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo del proyecto

El presente proyecto plantea la integración de tecnologías IT/OT dentro de una arquitectura Edge-Cloud. Esta propuesta se centra en el diseño y despliegue de una infraestructura que permita la comunicación entre los elementos de operación en planta y los sistemas de gestión en la nube, optimizando la transmisión y visualización de datos operativos.

La arquitectura permite que los datos capturados desde los sensores del módulo MPS PA y PLCs sean procesados en el nivel Edge y posteriormente enviados a la capa Cloud para su análisis y almacenamiento. Este enfoque asegura la reducción de latencia, la mejora en la toma de decisiones y la disponibilidad constante de parámetros operativos.

Además, el sistema propuesto incorpora la integración de dashboards que proporcionan herramientas de monitoreo y visualización en tiempo real, reforzando la capacidad de supervisión y control de los parámetros operativos. En conjunto, la arquitectura IT/OT con enfoque Edge-Cloud constituye una solución escalable y adaptable que responde a los retos de la digitalización industrial.

3.2 Gestión parámetros operativos.

La gestión de parámetros operativos se indica en la Figura 5, inicia con la adquisición de datos, donde los sensores industriales entregan sus mediciones al PLC, que las convierte en información digital procesable. Luego, en la etapa de procesamiento, el PLC ejecuta la lógica de control programada en TIA Portal y el nodo Edge organiza y publica los datos mediante MQTT. Posteriormente, en el almacenamiento, la información es enviada al servidor Cloud OpenStack, donde queda registrada para su consulta y análisis. Finalmente, en la fase de supervisión, los valores operativos se visualizan en tiempo real mediante un dashboard en Grafana, permitiendo un monitoreo continuo.

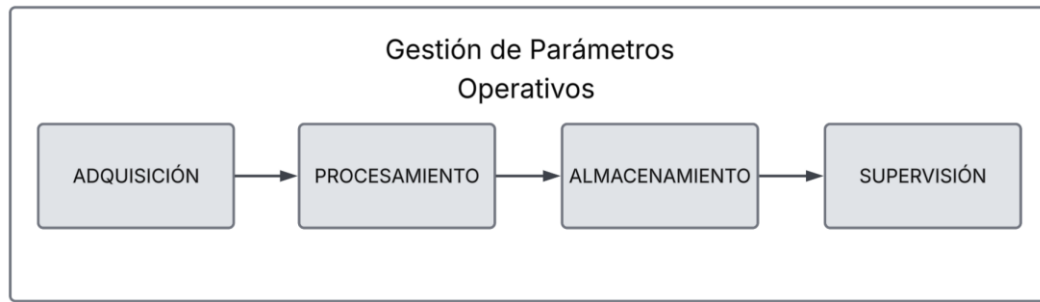


Figura 5. Gestión de Parámetros Operativos.

3.3 Topología física del sistema

En la Figura 6 se muestra la topología física del sistema, estructurada en un modelo distribuido que integra los niveles OT, IT y Cloud, permitiendo la comunicación fluida entre los dispositivos de campo y las plataformas de gestión y análisis en la nube. Esta arquitectura busca optimizar el flujo de información, desde la adquisición de datos en planta hasta su procesamiento y visualización en entornos virtualizados.

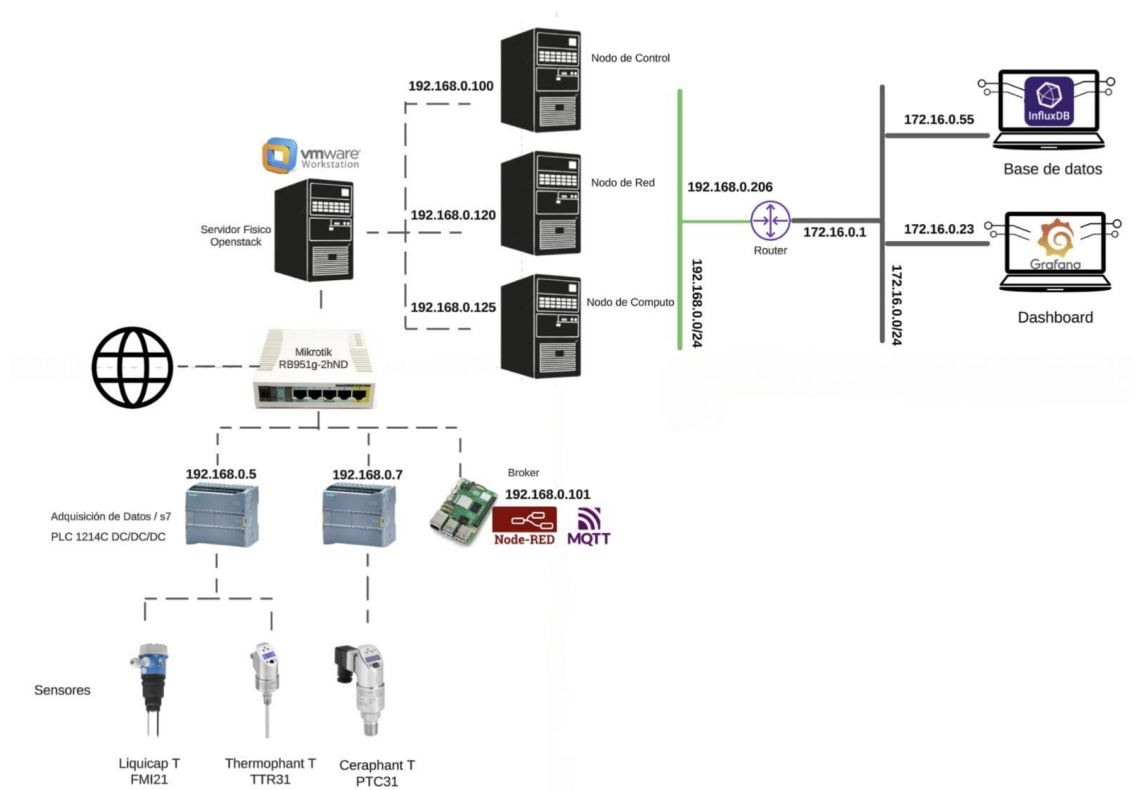


Figura 6. Topología física del sistema.

3.4 Esquema de la arquitectura

La relación de la infraestructura desarrollada con el modelo de referencia RAMI 4.0 se presenta en la Figura 7. Cada nivel de la pirámide corresponde directamente a las capas funcionales definidas por RAMI 4.0, permitiendo visualizar cómo los elementos del sistema se distribuyen desde el nivel físico hasta la capa de negocio.



Figura 7. Esquema de la arquitectura basado en Rami 4.0.

3.5 Configuración de las capas según el modelo RAMI 4.0

La configuración de las capas según el modelo RAMI 4.0 permite organizar de forma estructurada todos los componentes que intervienen en el sistema desarrollado. Esta organización resulta fundamental para comprender cómo interactúan los sensores, PLCs, dispositivos de red y plataformas de procesamiento dentro de la arquitectura propuesta. A partir de esta estructura, en las siguientes secciones se describe la configuración de los elementos que se ubican en cada capa del modelo.

3.5.1 Capa de activo

La Capa de Activo constituye el punto inicial del proceso de digitalización dentro de la arquitectura IT/OT, donde se ubican los dispositivos físicos que están encargados de interactuar directamente con el proceso, tal como lo podemos observar en la Figura 8. En esta capa se encuentran los sensores industriales que miden las variables operativas del sistema (nivel, temperatura y presión) correspondientes a la fase de Instancia - Operación, puesto que funcionan sobre el proceso real y generan información en tiempo real.

Dentro de la fase de conversión se encuentran los módulos que transforman la señal física original del sensor en una señal eléctrica estandarizada, puesto que estas señales no pueden enviarse directamente al PLC y requieren un proceso previo de conversión para garantizar compatibilidad, estabilidad y precisión en la adquisición de datos.

Para la conversión de la variable física a señal eléctrica, cada sensor transforma la magnitud física medida (nivel, temperatura o presión) en una señal estándar:

- Liquicap T FMI21 (nivel): convierte cambios de capacitancia en una señal analógica I/V.
- Thermophant T TTR31 (temperatura): convierte la variación térmica en una señal de voltaje proporcional (T/V).
- Ceraphant T PTC31 (presión): transforma la deformación del diafragma en una señal eléctrica proporcional a la presión ($p_1 \neq p_2$).

Estos principios de conversión permiten que las magnitudes físicas del proceso se normalicen en señales estandarizadas, el diagrama de conexión se representa en el Anexo A, garantizando la correcta interpretación por parte de la capa de integración.

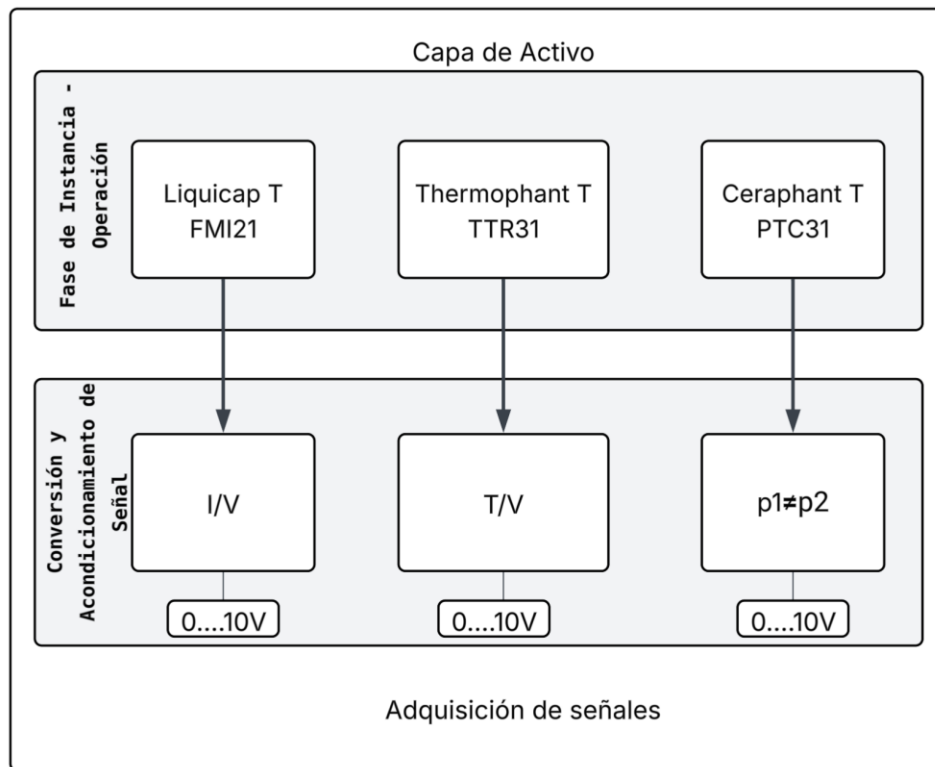


Figura 8. Capa de Activo.

3.5.2 Capa de integración

La Capa de Integración desempeña un papel esencial al garantizar una comunicación eficiente y un control exacto sobre los activos que conforman el sistema. El PLC Siemens S7 1214C DC/DC/DC se sitúa en la misma, este dispositivo recibe las señales provenientes de los sensores, las procesa mediante lógicas de control programadas realizadas en el software TIA PORTAL V15.1 y las convierte en datos accesibles para la capa de comunicación, tal como lo mostramos en la Figura 9.

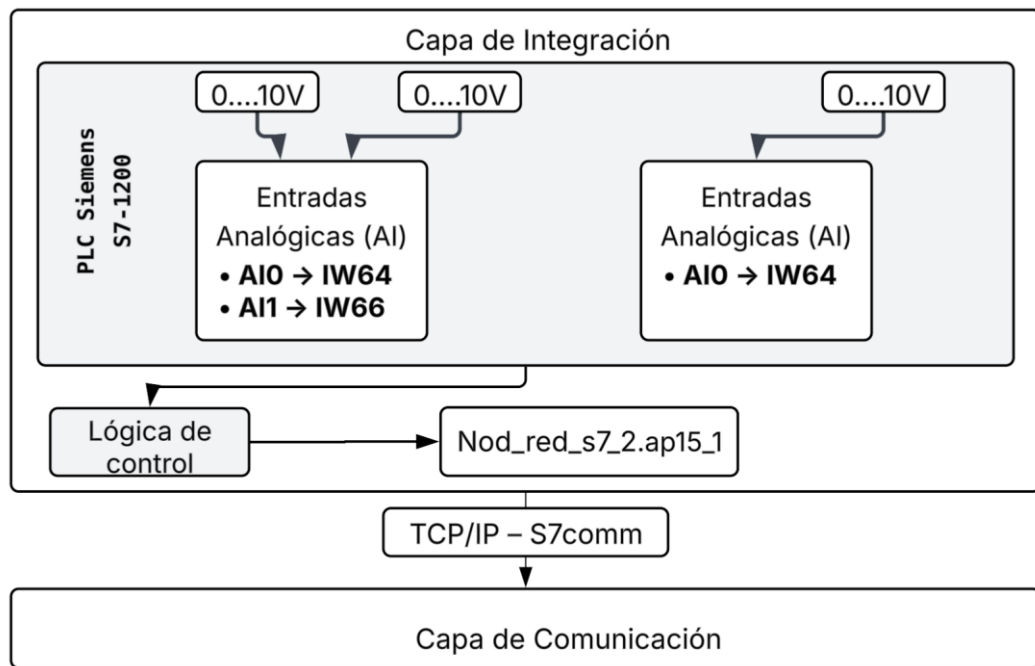


Figura 9. Capa de Integración.

La lógica de control se la realiza mediante la programación del PLC Siemens S7-1200 en TIA Portal, con estructuras de bloques funcionales destinados a gestionar la adquisición de señales analógicas provenientes de los sensores de nivel, temperatura y presión, y a convertirlas posteriormente en valores normalizados para su uso dentro del sistema de monitoreo.

En primer lugar, se definieron los tags o variables del proyecto, donde cada canal analógico del PLC fue asociado a la entrada correspondiente del módulo de acondicionamiento de señales. Estas variables representan el voltaje recibido (0–10 V) y constituyen el punto inicial del procesamiento dentro del programa del usuario.

Posteriormente, se implementaron funciones internas de TIA Portal, como NORMAL_X y SCALE_X, que permiten transformar el valor analógico de entrada en un rango físico interpretable.

- NORMAL_X realiza la normalización del voltaje recibido, convirtiéndolo en un valor entre 0 y 1.

- `SCALE_X` toma el valor normalizado y lo escala al rango físico real de la variable medida (por ejemplo, centímetros de nivel, grados Celsius o bar de presión).

Estas funciones fueron encapsuladas dentro de un bloque funcional (Function Block), denominado `conversion_voltaje`, el cual centraliza el procesamiento de cada sensor. De esta manera, el programa obtiene una estructura modular en la que cada instancia del bloque procesa un sensor distinto.

En el Anexo B se presenta de manera íntegra la programación desarrollada en TIA PORTAL, realizada en lenguaje FBD (Function Block Diagram), incluyendo las configuraciones de variables y bloques funcionales utilizados para el procesamiento y el escalamiento de señales.

3.5.3 Capa de Comunicación

El broker MQTT implementado en una Raspberry Pi se localiza en la capa de Comunicación. Este componente actúa como núcleo de distribución de datos bajo el paradigma de publicación/suscripción, permitiendo que los mensajes provenientes del PLC sean compartidos de manera estandarizada con múltiples clientes. Su papel principal en RAMI 4.0 es garantizar el intercambio confiable y en tiempo real de información, facilitando la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos.

De igual forma, el router MikroTik RB951g-2hND pertenece a la capa de Comunicación. Este equipo cumple un rol esencial como frontera de red entre el dominio OT y el dominio IT. En el marco de RAMI 4.0, representa la infraestructura de conectividad para la integración empresarial y el acceso seguro a redes externas.

El diagrama de funcionamiento de la Capa de Comunicación del proyecto se presenta en la Figura 10.

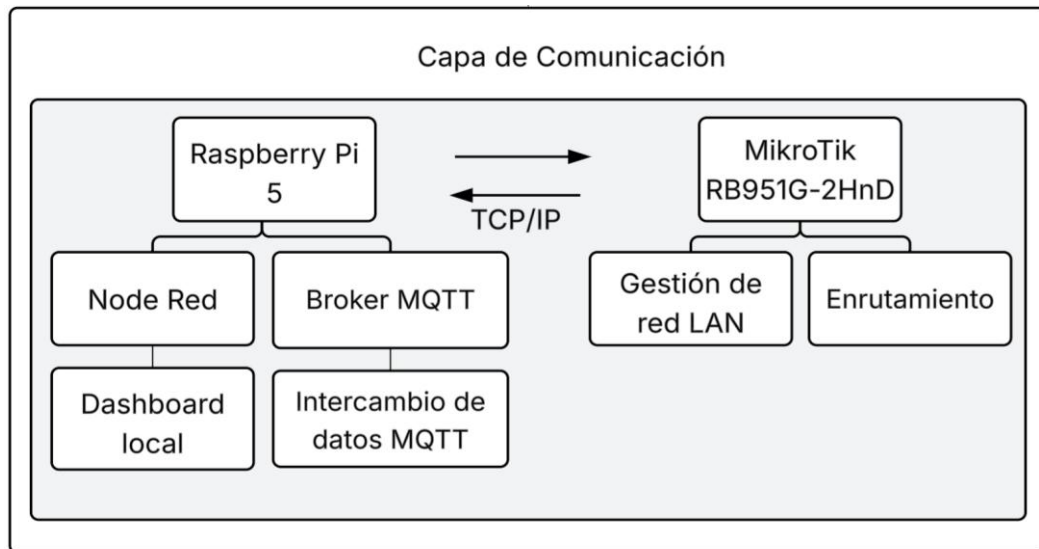


Figura 10. Capa de Comunicación.

3.5.4 Capa de Información

Esta capa se encarga de recibir, depurar, estructurar y almacenar los datos provenientes del entorno operativo (OT), garantizando su calidad y disponibilidad antes de ser enviados a la capa funcional. Su alcance se centra exclusivamente en la gestión del dato, sin aplicar lógica de visualización ni análisis avanzado. Dentro del modelo RAMI 4.0, esta capa se relaciona con la organización, almacenamiento y disponibilidad de datos, su funcionamiento en el proyecto se observa en la Figura 11.

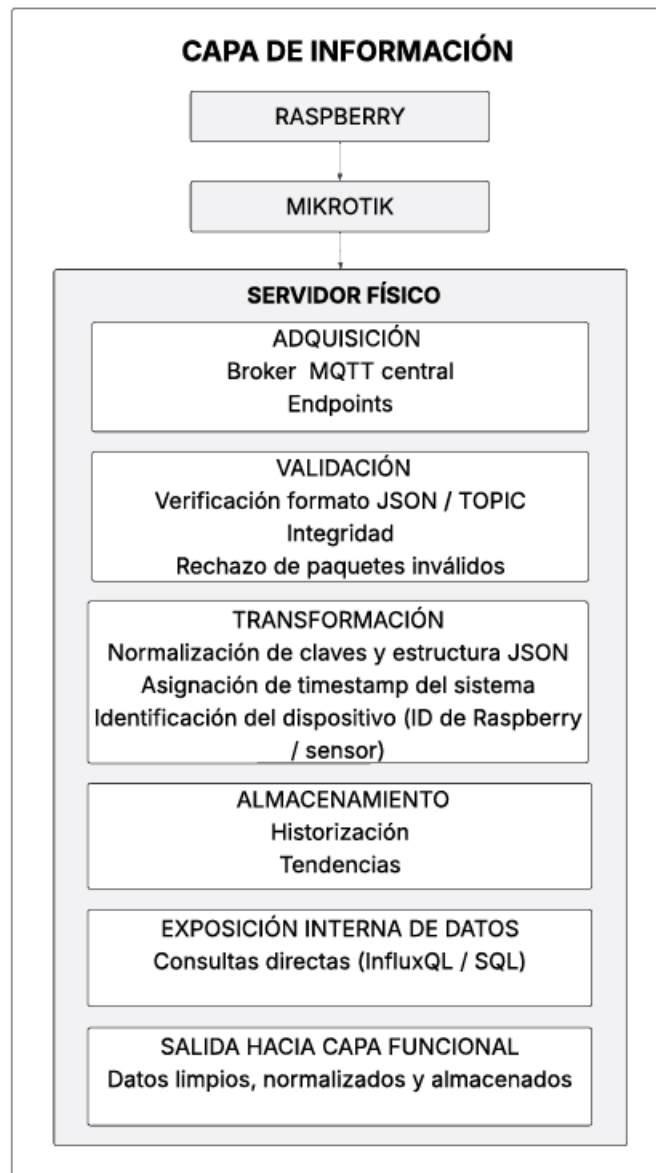


Figura 11. Capa de Información.

Desde la capa de comunicación, la Raspberry se conecta al Mikrotik, que actúa como gateway, gestionando el tráfico seguro y encapsulado hacia la red IT, aquí el servidor físico recibe mensajes en forma de MQTT topics, Solicitudes REST Y Mensajes JSON.

Luego se adquieren de datos, el bróker de MQTT recibe los publish desde la Raspberry y los Endpoints permiten el envío./recepción de datos vía HTTP, organizando así la entrada de información.

Antes de almacenar cualquier dato, se verifica que sea correcto, pasando así a la etapa de validación, donde se revisa que el formato JSON y que el Topic esté

correcto, se garantiza que el mensaje no llegue corrupto o incompleto es decir íntegro y por último se rechaza mensajes vacíos, nulos o con valores no numéricos, así solamente entran datos buenos y se bloquean valores erróneos.

Seguido, se prepara los datos para que sean coherentes y uniformes, mediante normalización de claves y estructuras de JSON consistente, asignando timestamp del servidor e incluso identificando el dispositivo o sensor con un ID.

Una vez corregidos y preparados, los datos se almacenan en una Base de datos, para tener históricos y tendencias de los valores. Ya almacenados y estructurados, los datos se ponen a disposición solo para consulta, obteniendo así una salida hacia la capa Funcional con datos limpios, normalizados y almacenados.

3.5.5 Capa de función

Los nodos de control, red y cómputo se sitúan en la capa de Función. Estos nodos ejecutan procesos de orquestación y administración, proporcionando capacidades específicas como control avanzado de procesos, gestión de tráfico de red y cómputo distribuido. En RAMI 4.0, reflejan la transición desde la gestión de datos hacia la provisión de servicios funcionales que agregan valor directo a la operación industrial.

Como se muestra en la Figura 12, la información llega desde la Capa de Información y es entregada a la infraestructura virtual desplegada en OpenStack. La comunicación interna entre servicios se realiza sobre una red segregada lógicamente, utilizando VLAN tagging en la capa física y túneles VXLAN en la capa virtual, lo que permite aislar el tráfico de monitorización del resto de los servicios.

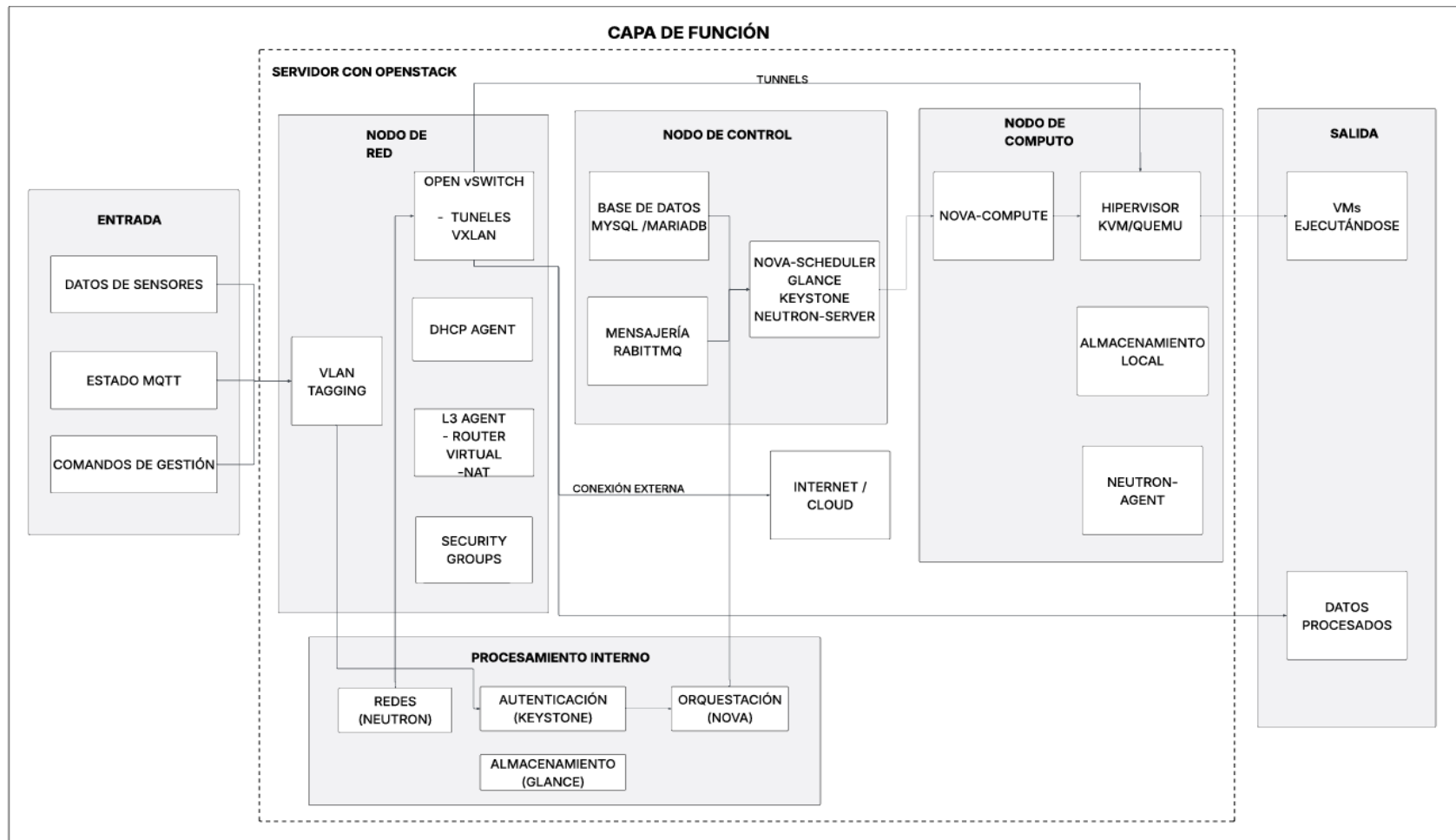


Figura 12. Capa de Función.

El nodo de control coordina los recursos virtuales a través de servicios como Neutron (gestión de redes virtuales), RabbitMQ (mensajería y orquestación interna de eventos) y MySQL/MariaDB (metadatos de OpenStack), asegurando que los datos provenientes del entorno OT circulen de forma segura y ordenada hacia las máquinas virtuales correspondientes. En los nodos de cómputo se ejecutan las instancias virtuales donde residen los microservicios de procesamiento, validación funcional y lógica de aplicación.

En la Figura 13, se detallan los pasos a seguir para la instalación de paquetes y servicios necesarios para el despliegue de OpenStack, tomados de la guía presentada en la cita número 70.

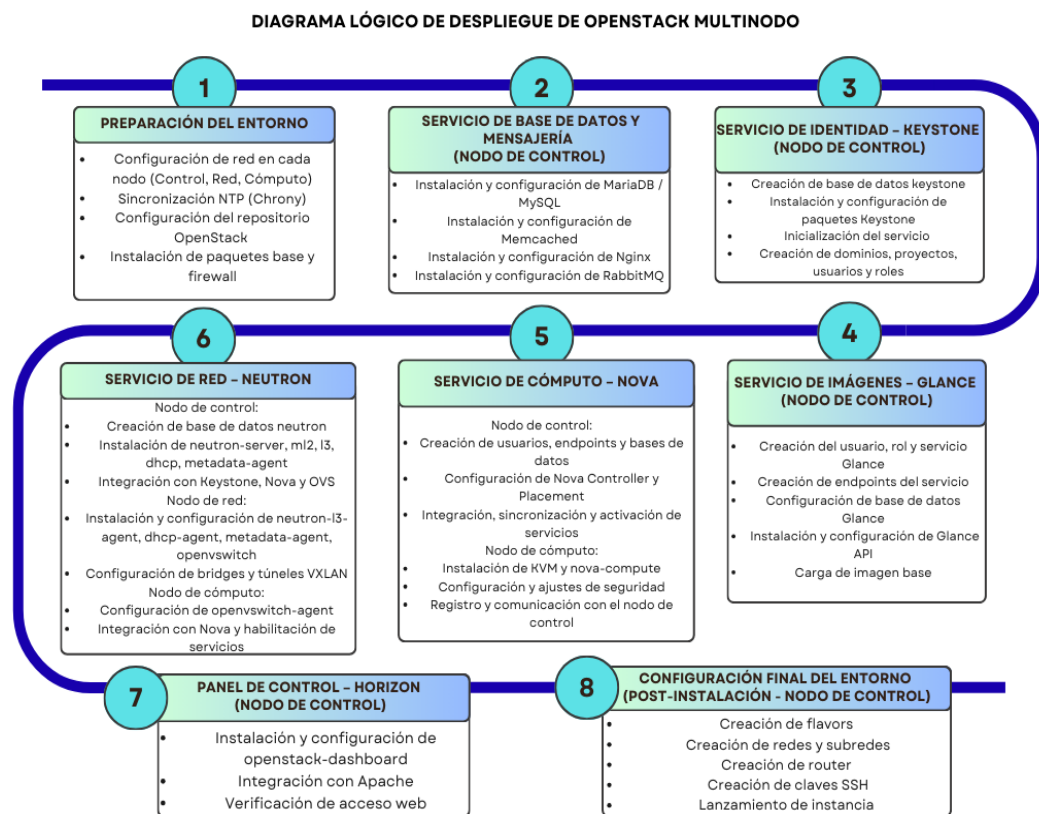


Figura 13. Despliegue de Openstack.

3.5.6 Capa de Negocio

El entorno de Internet o Nube se ubica en la capa de Negocio y en el nivel de Mundo Conectado. Este nivel representa la extensión de la infraestructura empresarial hacia entornos globales, donde la información se convierte en valor estratégico. La nube constituye el nivel donde los datos de planta se traducen en conocimiento y decisiones de negocio.

Como se observa en la Figura 14, en la nube del proyecto se han creado dos instancias: una destinada a InfluxDB, encargada de almacenar las series temporales con retención histórica y consultas, la otra instancia es para el uso de Grafana, que funciona como plataforma de visualización y generación de alertas sobre los datos operativos.

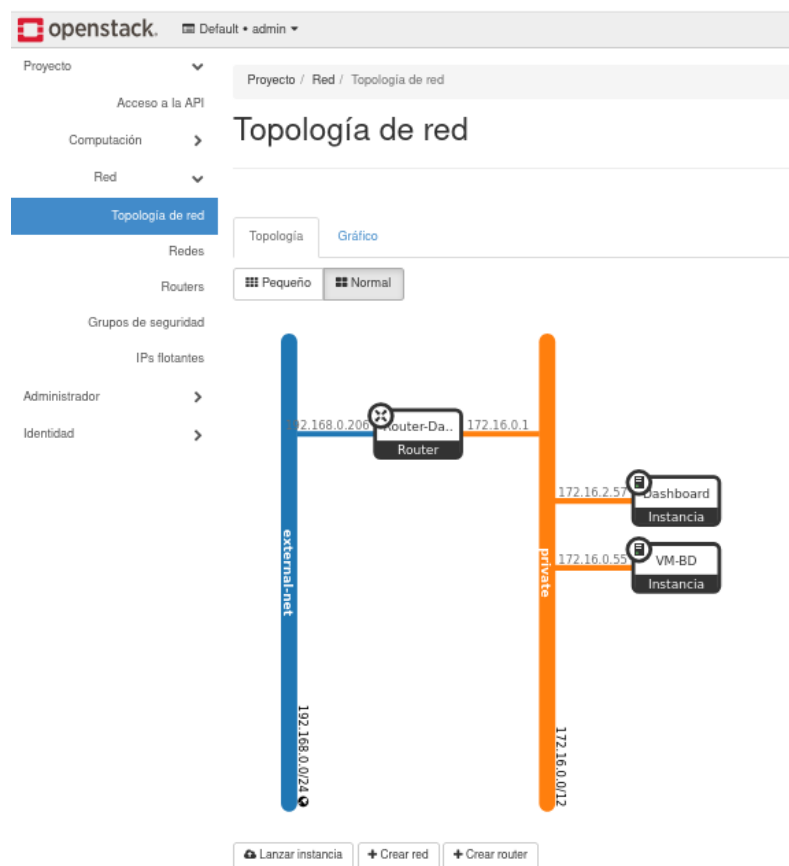


Figura 14. Capa de Negocio.

El flujo en esta capa se muestra en la Figura 15, empezando con los datos almacenados en InfluxDB para luego ser visualizados en Grafana y posteriormente interpretados por los usuarios. Esta información analizada sirve como base para la toma de decisiones estratégicas orientadas a mejorar el rendimiento y la gestión del sistema.



Figura 15. Capa de Negocio.

A partir de la historización realizada en InfluxDB y la visualización mediante Grafana, se planteó el uso de distintos actores que pueden consultar indicadores clave, analizar y tomar decisiones basadas en datos reales y actualizados. En la Tabla 14 identifica los roles involucrados y la forma en que se debería emplear las herramientas:

Tabla 14. Roles y actividades sugeridas para el uso de las herramientas InfluxDB y Grafana.

Rol	Uso de InfluxDB y Grafana	Actividades
Directivos	Dashboards ejecutivos (indicadores globales de producción y disponibilidad)	Toma de decisiones estratégicas
Gerencia de Producción	Métricas operativas en tiempo real (temperatura, presión, nivel por línea)	Supervisión y planificación de producción
Analistas de Datos	Consultas a series de tiempo; creación y ajuste de paneles	Análisis de tendencias y reportes.
Mantenimiento Industrial	Alertas automáticas (umbrales y eventos críticos)	Acciones preventivas y correctivas
Control de Calidad	Seguimiento histórico de variables del proceso	Mejora de calidad y reducción de fallas
Operadores de Planta	Paneles visuales simples (estado normal/alarma por sensor)	Verificación rápida y respuesta inmediata

3.6 Monitoreo de la red industrial

El sistema desarrollado integra una plataforma de visualización en tiempo real, permitiendo observar las variables operativas provenientes del PLC (presión, temperatura y nivel) mediante dashboards accesibles desde el entorno Edge y la

nube. La Figura 16, muestra la evolución del sistema de monitoreo, iniciando con una visualización básica implementada en Node-RED, donde los indicadores tipo gauge y las gráficas de tendencia permiten validar la correcta adquisición y transmisión de datos desde los sensores. Posteriormente, se incorporó una interfaz más robusta en Grafana, representado en la Figura 17.

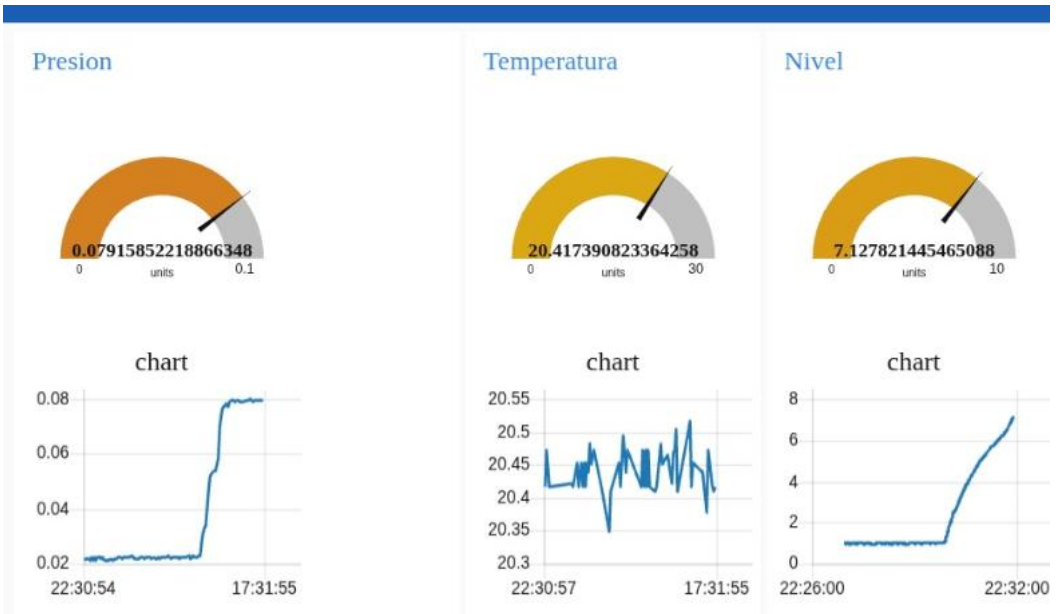


Figura 16. Dashboard en el nodo Edge.



Figura 17. Dashboard en la Cloud.

La comparación entre Node-RED y Grafana permite evaluar el desempeño de las plataformas de visualización implementadas en la arquitectura del sistema de monitoreo. Mientras Node-RED, ejecutado en la Raspberry Pi, tiene una interfaz ligera orientada a la supervisión local y al flujo de datos en tiempo real, Grafana, desplegado en el servidor de OpenStack, proporciona una visualización más estable, estética y escalable, complementada con capacidades avanzadas como selección temporal, tablas históricas y filtros temporales.

Esta etapa confirma la correcta convergencia IT/OT dentro de la arquitectura Edge-Cloud, ya que los valores capturados por el PLC son procesados en el nodo Edge, enviados mediante MQTT hacia el servidor en OpenStack y finalmente presentados con actualización continua en las instancias de la nube. Las gráficas de tendencia permiten identificar comportamientos del proceso como incrementos de nivel, variaciones térmicas y estabilidad de presión, lo cual demuestra la capacidad del sistema para soportar aplicaciones de supervisión industrial y análisis posterior, garantizando un correcto monitoreo de los activos de la red.

3.7 Pruebas de funcionamiento

Con el propósito de analizar el comportamiento dinámico del sistema, se recopilieron 30 muestras de las variables de nivel, presión y temperatura. Las pruebas de funcionamiento permitieron verificar el comportamiento real del sistema frente a variaciones controladas de las condiciones de operación, se observó la respuesta de los sensores y la correcta adquisición, transmisión y visualización de los datos mediante la plataforma Grafana como parte del sistema de monitoreo en la arquitectura IT/OT.

La Tabla 15 presenta el conjunto de valores registrados en la base de datos de InfluxDB, constituyendo la base para el análisis posterior sobre la precisión y el desempeño de las mediciones.

Tabla 15. Datos obtenidos en las pruebas funcionamiento del sistema.

Muestra	Nivel (L)	Presión (bar)	Temperatura (°C)
1	0.50	0.095	18.665
2	1.00	0.110	18.700
3	1.50	0.125	18.720
4	2.00	0.169	18.764
5	2.50	0.150	18.780
6	3.00	0.118	18.764
7	3.25	0.125	18.800
8	3.50	0.131	18.824
9	3.75	0.145	18.840
10	4.00	0.156	18.826
11	4.20	0.165	18.860
12	4.40	0.178	18.880
13	4.60	0.190	18.900
14	4.80	0.198	18.885
15	5.00	0.205	18.895
16	5.20	0.210	19.000
17	5.35	0.218	19.200
18	5.50	0.225	19.400
19	5.80	0.230	19.600
20	6.00	0.236	19.750
21	6.20	0.240	19.850
22	6.40	0.247	19.900
23	6.60	0.252	19.950
24	6.80	0.255	19.970
25	7.00	0.258	19.980
26	7.25	0.260	20.000
27	7.40	0.262	20.005
28	7.45	0.265	20.020
29	7.48	0.268	20.030
30	7.50	0.270	20.040

En la Figura 18 se observa el proceso en el que se realizan variaciones controladas sobre los sensores de nivel, presión y temperatura del módulo MPS-PA, mientras simultáneamente se monitorean en tiempo real los datos transmitidos hacia la infraestructura en la nube.



Figura 18. Pruebas con variaciones controladas en los sensores.

3.7.1 Análisis de Precisión de las Señales de Proceso

Para este análisis se realizó una comparación directa entre las variables físicas medidas en el proceso y las señales eléctricas obtenidas por el PLC después de la etapa de conversión y acondicionamiento. Este procedimiento permitió evaluar la fidelidad de los valores registrados por los sensores de nivel, presión y temperatura que se reflejan en los voltajes adquiridos, considerando el comportamiento real capturado durante las pruebas experimentales. A partir de las tablas de datos y las gráficas generadas para cada variable, se determinó la relación existente entre ambas señales.

La precisión se refiere a qué tanto coincide la señal convertida (voltaje) con la variable física real medida por el sensor y se la calculó con siguiente Ecuación 1:

$$Error \% = \left| \frac{Valor\ real - Valor\ estimado}{Valor\ real} \right| * 100 \quad (1)$$

El “Valor real” proviene del voltaje leído por el PLC y el “Valor estimado” del proceso de conversión y escalamiento dentro del PLC.

a. Precisión en la señal del sensor de Presión

Se empleó el transmisor Ceraphant T PTC31, cuya salida analógica es proporcional a la presión medida. A partir de los datos experimentales que se muestran en la Tabla 16 y la Figura 19 se obtuvo una relación lineal entre la presión y el voltaje en el rango de operación de 0,095 a 0,262 bar.

$$V \approx 24,55 \cdot P + 0,008 \quad (2)$$

Tabla 16. Comparación entre Señal de Presión y Señal de Voltaje.

Tiempo (s)	Presión (bar)	Voltaje Presión (V)
0	0.095	2.35
10	0.169	4.15
20	0.118	2.90
30	0.131	3.22
40	0.156	3.84
50	0.198	4.87
60	0.206	5.06
70	0.236	5.81
80	0.262	6.44

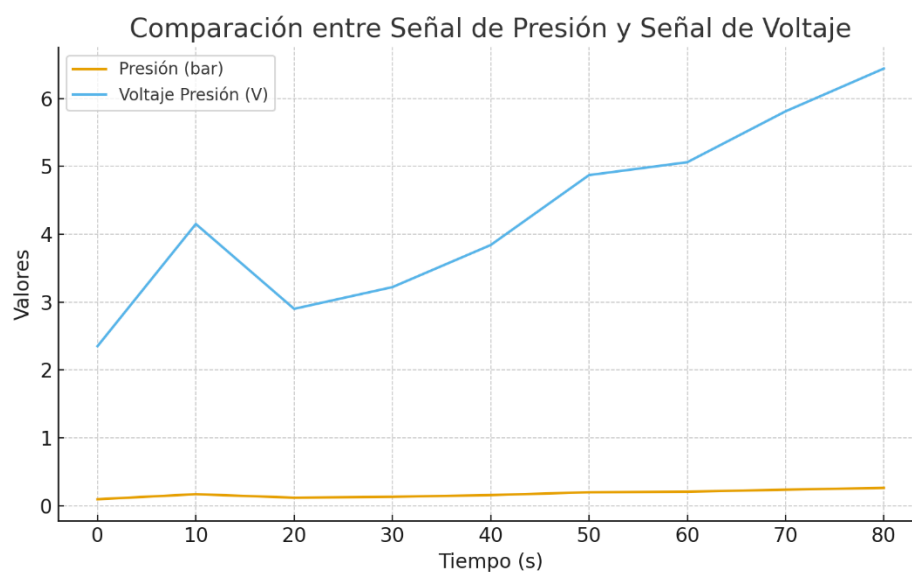


Figura 19. Comparación entre Señal de Presión y Señal de Voltaje.

Para cada punto se determinó el valor estimado empleando la Ecuación 2, posteriormente se calculó el porcentaje de error mediante la Ecuación 1, obteniendo como resultado un promedio cercano al 0,13 %. Estos resultados evidencian que la etapa de conversión y acondicionamiento de la señal de presión presenta una alta precisión dentro del rango de trabajo considerado.

b. Precisión en la señal del sensor de Temperatura

La Tabla 17 y la Figura 20 muestran la relación directa entre la temperatura medida y el voltaje registrado, evidenciando que la señal analógica del sensor mantiene una proporcionalidad lineal constante a lo largo del tiempo. Para obtener el valor esperado se emplea la Ecuación 3, que nos ayuda a realizar un escalamiento.

$$Temp_estimada = Voltaje \times 10 \quad (3)$$

Tabla 17. Comparación entre Señal de Temperatura y Señal de Voltaje.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Voltaje Temp (V)
0	18.665	1,8665
10	18.764	1,8764
20	18.764	1,8764
30	18.824	1,8824
40	18.826	1,8826
50	18.885	1,8885
60	18.895	1,8895
70	19.997	1,9997
80	20.005	2,0005

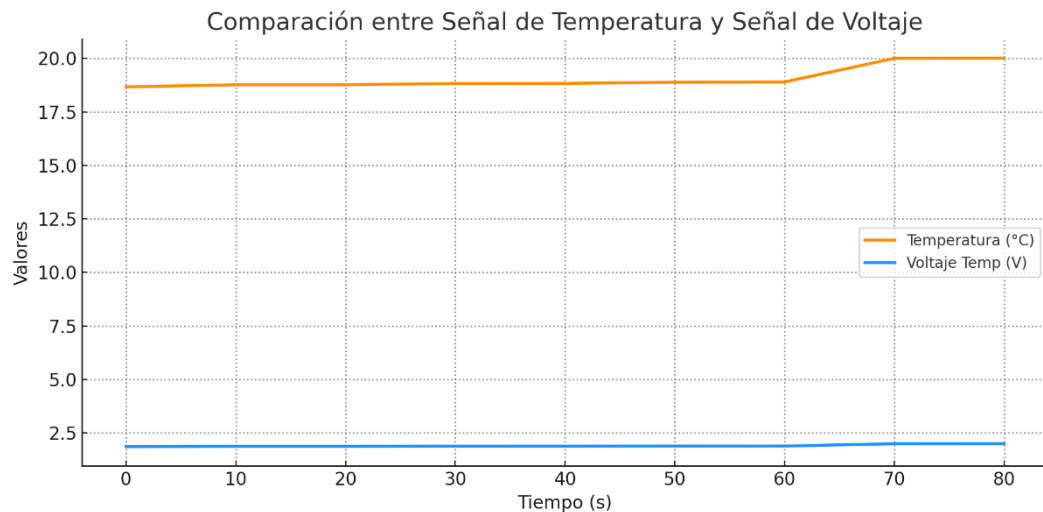


Figura 20. Comparación entre Señal de Temperatura y Señal de Voltaje.

La comparación entre la temperatura real y la señal de voltaje adquirida por el PLC muestra una relación exacta en todos los puntos medidos. Al aplicar la Ecuación 3, la temperatura estimada coincide con la temperatura real, obteniéndose un error relativo promedio del 0 %.

c. Precisión en la señal del sensor de Nivel

Las pequeñas variaciones registradas entre el valor real y la señal convertida que se muestran en la Tabla 18, junto con la Figura 21 evidencian una relación prácticamente lineal entre los valores en litros y el voltaje leído por el PLC.

Tabla 18. Comparación entre Señal de Nivel y Señal de Voltaje.

Tiempo (s)	Nivel (L)	Voltaje Nivel (V)
0	0.5	0.55
10	2	2.00
20	3.5	3.49
30	4	4.02
40	4.5	4.51
50	5	5.00
60	5.5	5.52
70	7	7.00
80	7.5	7.51

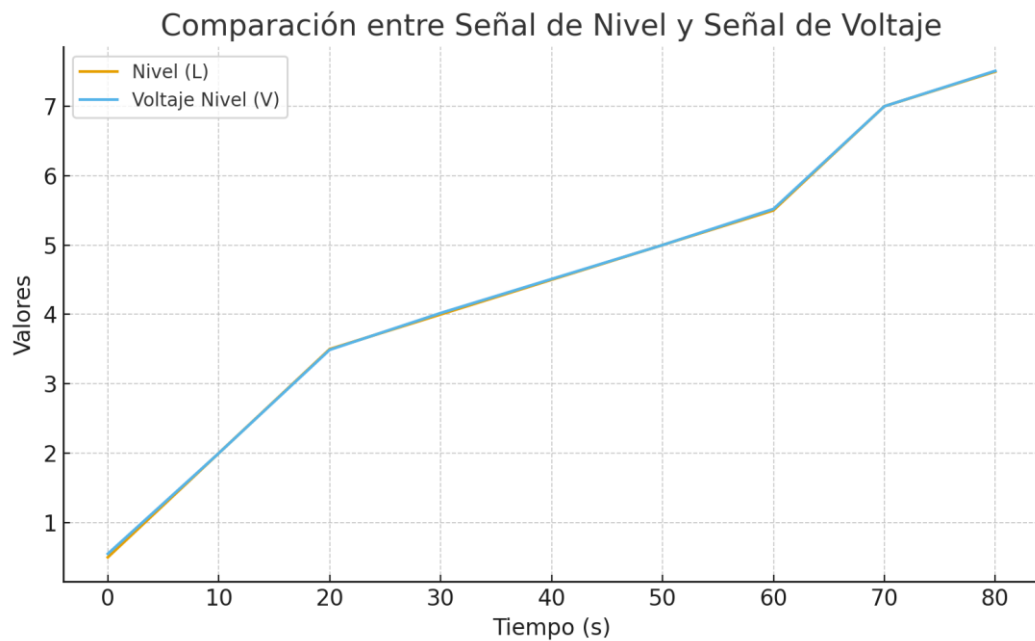


Figura 21. Comparación entre Señal de Nivel y Señal de Voltaje.

Empleando la Ecuación 1, se ha determinado que el mayor error se presentó en el primer punto con aproximadamente un 9 %, mientras que en el resto de las mediciones diferencia entre el voltaje real y el valor estimado se mantuvo por debajo del 1 %, por sensibilidad del sensor cerca de valores pequeños.

3.7.2 Prueba de Estrés

Para evaluar el desempeño completo del sistema, se ejecutaron pruebas de estrés enfocadas en medir la latencia bajo distintas cargas de sensores. Para ello, se simuló el envío continuo de mensajes desde la Raspberry Pi hacia la base de datos InfluxDB alojada en la nube, donde posteriormente fueron procesados y visualizados en Grafana.

Se generó un script en Python el cual simula varios sensores enviando mensajes al broker MQTT. Cada mensaje incluye una marca de tiempo. Cada vez que el broker confirma la recepción (ACK), el código calcula la latencia del mensaje y la guarda. Al final, tal como se muestra en la Figura 22, al ejecutar el scrib muestra cuántos mensajes se enviaron, cuántos fueron confirmados, la pérdida, y estadísticas de latencia. También genera un archivo CSV con todas las latencias medidas.

```

# ----- Resultados -----
print("\n--- RESULTADOS ---")
print(f"Enviados: {enviados}")
print(f"Confirmados: {confirmados}")
perdida = 100 - (confirmados / enviados * 100)
print(f"Pérdida: {perdida:.2f}%")

if latencias:
    print(f"Latencia media: {mean(latencias):.2f} ms")
    print(f"Jitter (STDEV): {stdev(latencias):.2f} ms")
    print(f"Mínima: {min(latencias):.2f} ms")
    print(f"Máxima: {max(latencias):.2f} ms")

# Guardar latencias
with open("resultados_mqtt.csv", "w") as f:
    f.write("latencia_ms\n")
    f.writelines(f"{l}\n" for l in latencias)

print("Archivo generado: resultados_mqtt.csv\n")

if __name__ == "__main__":
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument("--broker", required=True)
    parser.add_argument("--sensores", type=int, required=True)
    parser.add_argument("--intervalo", type=float, default=0.1)
    parser.add_argument("--duracion", type=int, default=1800)
    args = parser.parse_args()
    main(args.broker, args.sensores, args.intervalo, args.duracion)

```

Figura 22. Script de envío de datos para generar estrés

Las pruebas se realizaron con dos escenarios: uno enviando datos de 100 sensores, mostrado en la Figura 23, y otro con el envío de 150 sensores, presentado en la Figura 24. Para los dos casos, las pruebas se realizaron en un tiempo de 30 minutos y con un intervalo de envío de 0.1 ms.

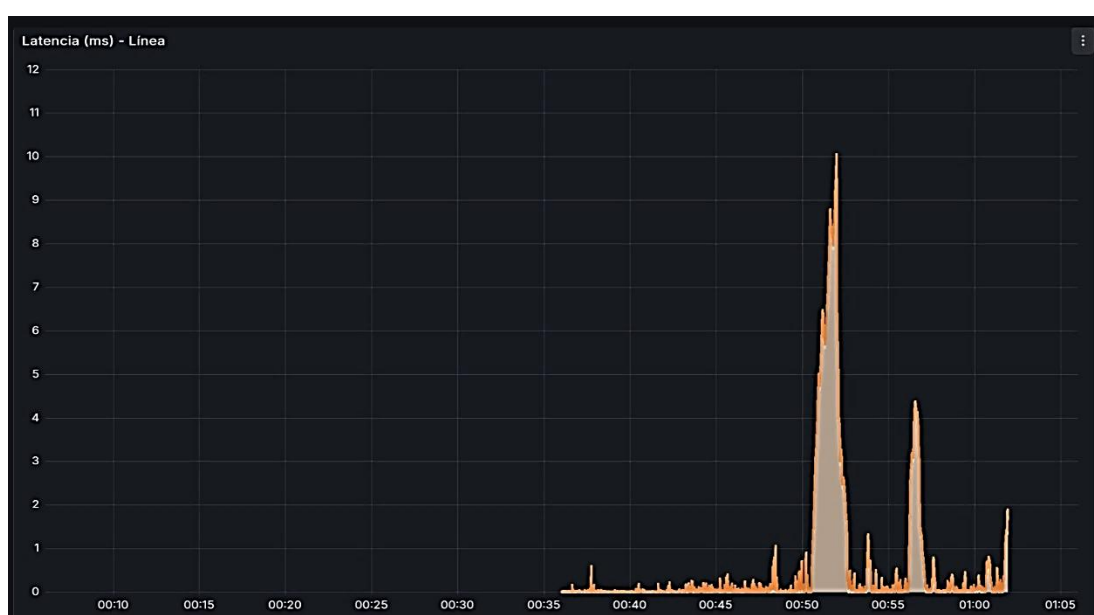


Figura 23. Prueba de estrés con datos de 100 sensores.

De la prueba con los 100 sensores se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 19. Resultados del estrés con 100 sensores.

Parámetro	100 Sensores
Tiempo total de prueba	30 min
Intervalo de envío por sensor	0.1 ms
Mensajes enviados	1,782,800
Mensajes recibidos	1,764,000
Pérdida de mensajes (%)	1.05 %
Latencia mínima	0.1 ms
Latencia máxima	1 ms

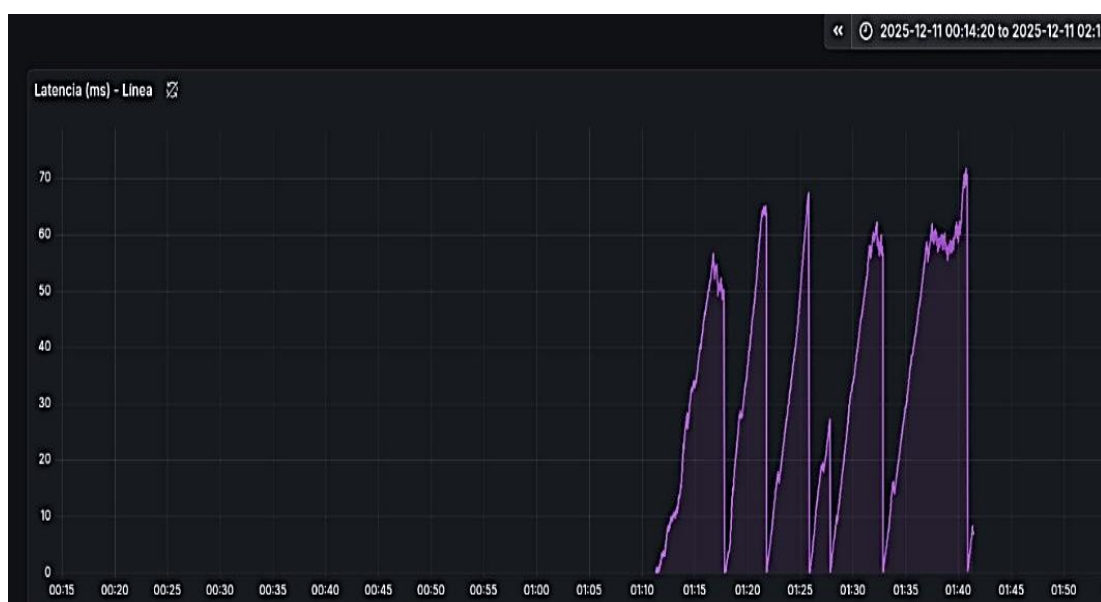


Figura 24. Prueba de estrés con datos de 150 sensores.

En cuanto a la prueba con los 150 sensores, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 20. Resultados del estrés con 150 sensores.

Parámetro	150 Sensores
Tiempo total de prueba	30 min
Intervalo de envío por sensor	0.1 ms
Mensajes enviados	2,692,980
Mensajes recibidos	2,610,000
Pérdida de mensajes (%)	3.08 %
Latencia mínima	28 ms
Latencia máxima	72 ms

Al comparar las latencias promedio en ambos escenarios, tal como se muestra en la Figura 25, los resultados muestran que el sistema mantiene un rendimiento óptimo con cargas moderadas (100 sensores), presentando latencias muy bajas y pérdidas mínimas de mensajes. Sin embargo, al incrementar la carga a 150 sensores, la infraestructura comienza a mostrar saturación: la latencia aumenta significativamente y la pérdida de mensajes se triplica. Esto evidencia que el sistema alcanza su límite operativo cerca de esta carga, indicando la necesidad de optimizaciones en el canal de comunicación, capacidad del broker o recursos de la nube para garantizar estabilidad cuando se incrementa el número de sensores. Si el sistema requiere escalar a niveles superiores, sería recomendable aplicar técnicas de balanceo, procesamiento paralelo o aumentar la capacidad del nodo Edge/Cloud.

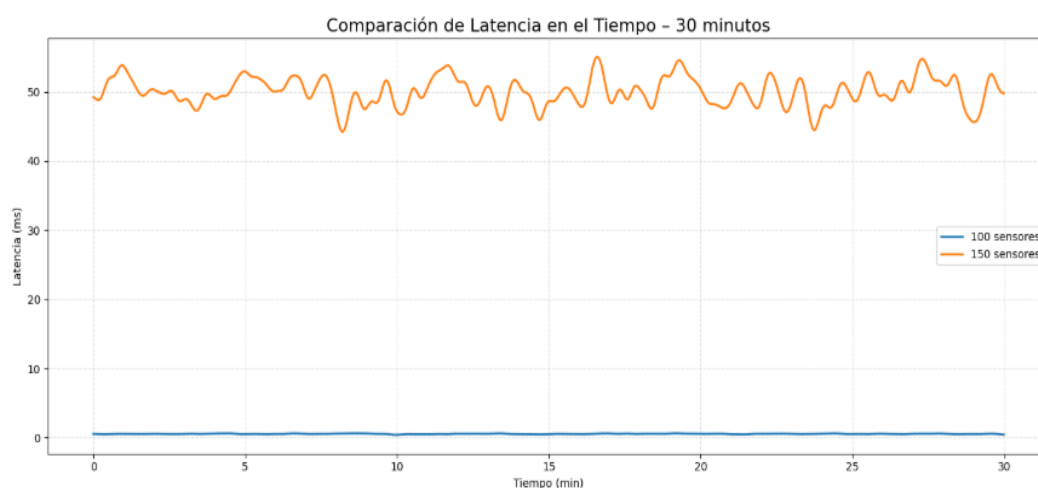


Figura 25. Comparación de Latencia en el tiempo – 30 min.

De igual forma, en la Tabla 21 se presentan los valores de throughput obtenidos a partir de los datos almacenados en cada escenario, calculados utilizando Excel a partir del archivo CSV generado durante las pruebas, usando las siguientes fórmulas.

Mensajes por segundo (msg/s)

Se calcula dividiendo el total de mensajes por el tiempo total de la prueba:

$$\text{Mensajes totales} = \frac{\text{Tiempo total}}{\text{Intervalo de envío}} \times \text{Número de sensores} \quad (3)$$

- Para recibidos:

$$\text{Msgs/s (recibidos)} = \frac{\text{Mensajes recibidos totales}}{\text{Tiempo (s)}}$$

- Para enviados:

$$\text{Msgs/s (enviados)} = \frac{\text{Mensajes enviados totales}}{\text{Tiempo (s)}}$$

El throughput mide cantidad de datos por segundo. Se calcula como:

$$\text{Throughput} = \text{Mensajes por segundo} \times \text{Tamaño del mensaje (bits)}$$

Como el mensaje está en bytes, se multiplica por 8 para convertir a bits.

- **Throughput recibido:**

$$\text{Throughput recibido (bps)} = \text{Msgs/s (recibidos)} \times \text{Tamaño mensaje (bytes)} \times 8$$

- **Throughput enviado:**

$$\text{Throughput enviado (bps)} = \text{Msgs/s (enviados)} \times \text{Tamaño mensaje (bytes)} \times 8$$

Y para transformarlos a Mbps:

$$\text{Throughput (Mbps)} = \frac{\text{Throughput (bps)}}{1,000,000}$$

Tabla 21. Datos obtenidos de Throughput.

Métrica	100 Sensores	150 Sensores
Mensajes recibidos totales	1,764,000	2,610,000
Mensajes por segundo (recibidos)	980.00 msgs/s	1,450.00 msgs/s
Mensajes por segundo (enviados)	990.44 msgs/s	1,496.10 msgs/s
Throughput recibido	1.568 Mbps	2.32 Mbps
Throughput enviado	1.585 Mbps	2.394 Mbps
Throughput por sensor	15.68 kb/s	15.47 kb/s

Como se observa en la Figura 26, el sistema es capaz de manejar una mayor carga de datos; sin embargo, lo hace con mayor esfuerzo, acercándose a su límite operativo.

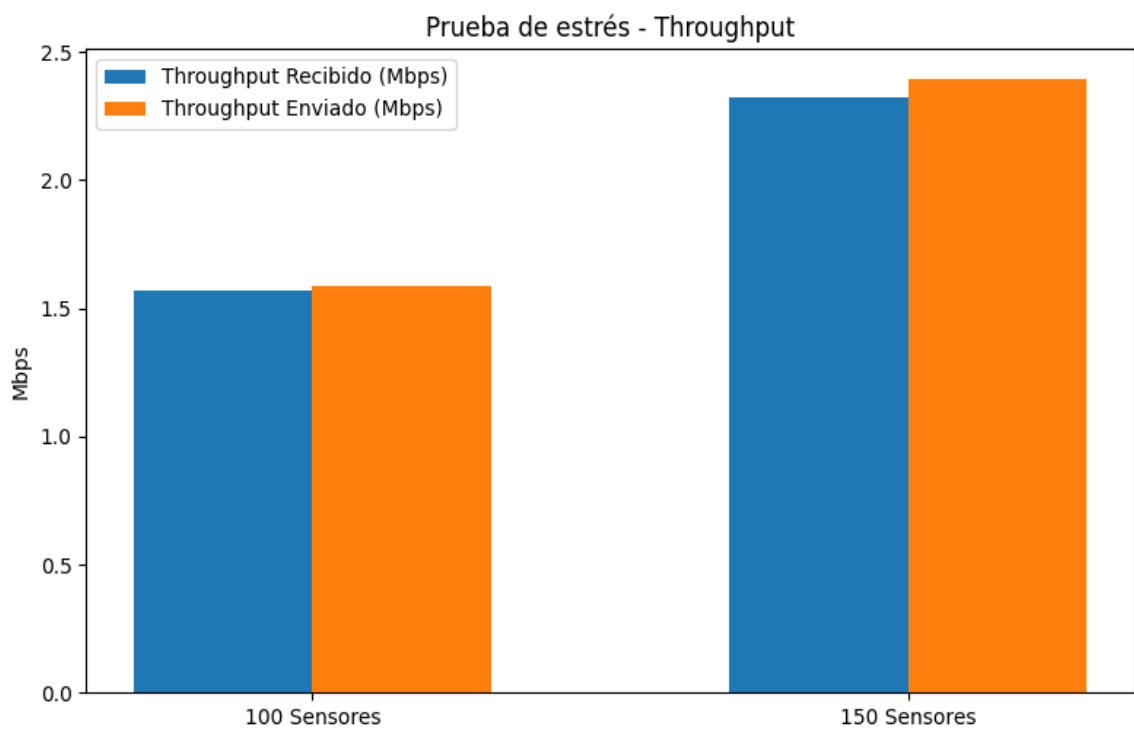


Figura 26. Prueba de estrés – Throughput

3.7.3 Recepción de alertas

La implementación de alertas permitió monitorear de manera continua las variables de presión, temperatura y nivel. Las alertas generadas por el sistema se visualizan en la Figura 27, mientras que las notificaciones enviadas a través de Telegram se muestran en la Figura 28.



Figura 27. Dashboard con el procesamiento de alertas.

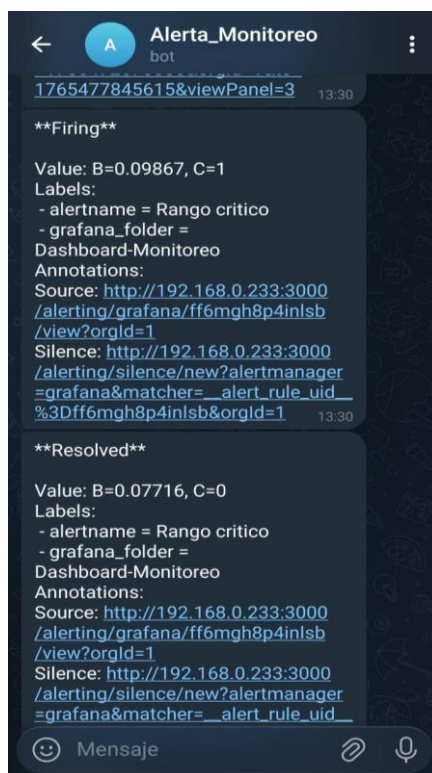


Figura 28. Alertas recibidas en Telegram.

En el dashboard, las alertas se dividen en dos partes: una se mantiene a la espera de que se cumpla la condición, y la otra envía la notificación a Telegram. Una vez resuelta la alerta, se genera otra según corresponda. Esto convierte al sistema de monitoreo en una herramienta poderosa, ya que permite recibir alertas en tiempo real sin necesidad de estar frente al panel de control, facilitando la toma de decisiones rápidas y oportunas.

3.8 Costos

En base al análisis técnico previamente desarrollado, en la Tabla 22 se presenta el listado y costo de materiales utilizados para la implementación del sistema de monitoreo industrial basado en arquitectura Edge–Cloud.

Tabla 22. Costos.

Material	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Raspberry Pi 5 Modelo B+ (RAM 4 GB)	1	\$150,00	\$150,00
Adaptadores USB– Ethernet	2	\$ 15,00	\$ 30,00
Tarjeta Micro SD 64 GB	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Cables de red	5	\$ 1,00	\$ 5,00
Mikrotik RB951G- 2HnD	1	\$ 75,00	\$ 75,00
TOTAL			\$ 275,00

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La arquitectura basada en RAMI 4.0 facilitó el diseño de una solución que integra las tecnologías operativas con las informáticas, permitiendo asegurar la interoperabilidad a través de las capas de Comunicación, Información y Función. Esta estructura posibilitó vincular los elementos físicos con los modelos lógicos, garantizando que el sistema capture, transforme, transmita y almacene los datos de las redes industriales.
- Las pruebas de estrés evidenciaron que el sistema mantiene un rendimiento óptimo bajo cargas moderadas menores a 100 sensores, mostrando latencias muy bajas, mínima pérdida de mensajes (1,05 %) y un throughput estable. Sin embargo, al incrementar la carga a 150 sensores, la latencia se eleva significativamente y la pérdida de mensajes aumenta a 3,08 %, lo que indica que la infraestructura alcanza su límite operativo en este rango.
- El sistema desarrollado demostró ser eficaz para el monitoreo de redes industriales, al permitir la adquisición, transmisión y visualización de datos continuamente, así como el envío de alertas a través del dashboard y Telegram, garantizando un control más eficiente de los parámetros operativos y la toma de decisiones oportuna.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar un proceso de verificación periódica de la calibración y la linealidad de las señales adquiridas por el PLC, especialmente en el caso del sensor de nivel, donde se observaron variaciones más notorias en valores cercanos a la zona baja de medición. Aunque la etapa de acondicionamiento demostró altos niveles de precisión en presión y temperatura, la sensibilidad del sensor de nivel ante valores pequeños puede introducir errores que eventualmente afecten el análisis del comportamiento del proceso.

- Se recomienda operar el sistema con cargas inferiores a los 100 sensores (o paquetes equivalentes) a un intervalo de envío de 0.1 ms, ya que en ese rango se garantiza un comportamiento del sistema adecuado entre velocidad de actualización, baja latencia y mínima pérdida de información. Mantenerse por debajo de este umbral permite evitar la acumulación de mensajes en cola, la sobrecarga del broker MQTT y el aumento de latencia, asegurando así un funcionamiento estable del sistema de monitoreo en la arquitectura Edge-Cloud.
- Se recomienda establecer diferentes perfiles de usuario que puedan consultar indicadores clave, analizar el comportamiento del sistema y tomar decisiones fundamentadas en datos reales y actualizados, aprovechando al máximo las capacidades de visualización que ofrecen Grafana e InfluxDB.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Santa, “Problemas de red afectan a casi la mitad de las empresas industriales,” *Factor de Éxito*, 1 de nov. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ecuador.revistafactordeexito.com/posts/47034/problemas-de-red-afectan-a-casi-la-mitad-de-las-empresas-industriales>. [Accedido: 20-abr-2025].
- [2] M. Ferreyra, “Industria 4.0: los desafíos claves de la integración OT–IT,” *Blog Cisco Latinoamérica*, 23 de sep. de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://gblogs.cisco.com/la/mferreyr-industria-4-0-los-desafios-claves-de-la-integracion-ot-it/>. [Accedido: 21-abr-2025].
- [3] I. Souza, “Principales desafíos de la Industria 4.0,” *IClass*, 31 de jul. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iclass.com.br/industria-4-0-es/principales-retos-de-la-industria-4-0/?lang=es>. [Accedido: 27-abr-2025].
- [4] S. Baños, “Reducir la brecha de convergencia entre IT y OT,” *Blog Español Schneider Electric*, 19 de oct. de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://blogespanol.se.com/transformacion-digital/gestion-en-tecnologias-de-la-informacion/2022/10/19/reducir-la-brecha-de-convergencia-entre-it-y-ot-asi-ayudan-las-nuevas-tecnologias-de-produccion-y-los-cambios-organizativos/>. [Accedido: 27-abr-2025].
- [5] D. Jiménez, “Edge computing: convergencia IT y OT en la Industria 4.0,” *ISA Sección Española*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://isa-spain.org/edge-computing-convergencia-it-y-ot-en-la-industria-4-0/>. [Accedido: 27-abr-2025].
- [6] V. Sales, “Edge computing: definición, ejemplos e importancia,” *Blog SYDLE*, 12 de abr. de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sydle.com/es/blog/edge-computing-6255a8bb3bbdd676573d5af3>. [Accedido: 7-may-2025].
- [7] D. Lema y W. Martínez, “Sistema IIoT por medio de una plataforma basada en la nube para la automatización del termotanque de la empresa Ecuapanel,” mar. de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22221>. [Accedido: 7-may-2025].

- [8] Z. Li, F. Fei, and G. Zhang, "Edge-to-Cloud IIoT for Condition Monitoring in Manufacturing Systems with Ubiquitous Smart Sensors," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5901, ago. de 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22155901>.
- [9] M. Giani, N. Frank, and A. Verl, "Towards Industrial Control from the Edge-Cloud: A Structural Analysis of Adoption Challenges According to Industrial Experts," *ResearchGate*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/367086275_Towards_Industrial_Control_from_the_Edge-Cloud_A_Structural_Analysis_of_Adoption_Challenges_According_to_Industrial_Experts. [Accedido: 25-nov-2025].
- [10] R. Román, M. Díaz, S. Ruíz, G. Cervantes, and M. Morales, "El internet de las cosas y la industria 4.0- Aplicaciones en el campo de la ingeniería industrial," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 2, jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n2-2024007>.
- [11] R. Tomalá, "Implementación de un sistema de control y monitoreo IIOT, para la adquisición de parámetros eléctricos en un motor trifásico," 19 de feb. de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/xmlui/handle/46000/13015>. [Accedido: 7-may-2025].
- [12] H. Malucín, "Implementación de un Cloud SCADA para el control y monitoreo de una estación didáctica de lavado y pintura de carrocerías, mediante V-NET," Tesis, ESPOCH, 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21969>. [Accedido: 7-may-2025].
- [13] A. S. George, "The Impact of IT/OT Convergence on Digital Transformation in Manufacturing," *Zenodo*, abr. 2024, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10895704>.
- [14] National Geographic, "Industrial Revolution and Technology." [En línea]. Disponible en: <https://education.nationalgeographic.org/resource/industrial-revolution-and-technology/>. [Accedido: 7-may-2025].

- [15] CEPAL, “Revolución tecnológica: desafíos y oportunidades para la industria, el empleo, la igualdad de género y el desarrollo social en América Latina y el Caribe,” *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, 24 de abr. de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/eventos/revolucion-tecnologica-desafios-oportunidades-la-industria-empleo-la-igualdad-genero>. [Accedido: 25-may-2025].
- [16] L. Joyanes Aguilar, *Industria 4.0: la cuarta revolución industrial*, 1.^a ed. Bogotá, Colombia: Alfaomega, 2018
- [17] Telefónica, “Diferencias entre digitalización y transformación digital,” 30 de dic. de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/diferencias-entre-digitalizacion-y-transformacion-digital/>. [Accedido: 25-may-2025].
- [18] J. Triadó, Digitalización del proceso. [En línea]. Disponible en: <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/13484d20-7337-4942-b9cd-9f7d54b255bd/content>. [Accedido: 26-may-2025].
- [19] Fortinet, “¿Qué es la tecnología operativa (OT)?,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fortinet.com/lat/solutions/industries/scada-industrial-control-systems/what-is-ot-security#:~:text=Conjunto%20de%20productos%20estrechamente%20integrados,amenazas%20en%20toda%20la%20empresa>. [Accedido: 26-may-2025].
- [20] UDLA Online, “¿Qué son las Tecnologías de la Información?,” 4 de abr. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://online.udla.edu.ec/contenidos-educativos/informatica/que-son-las-tecnologias-informacion/>. [Accedido: 26-may-2025].
- [21] Advanced Factories, “Beneficios y retos de la convergencia IT/OT en la industria,” 2 de ene. de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.advancedfactories.com/beneficios-retos-convergencia-it-ot-industria/>. [Accedido: 27-may-2025].

- [22] Akamai, “¿Cómo facilita la IA el Cloud Edge Computing?,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.akamai.com/es/glossary/what-is-cloud-edge-computing>. [Accedido: 27-may-2025].
- [23] L. Belcastro, F. Marozzo, A. Orsino, D. Talia, and P. Trunfio, “Navigating the Edge-Cloud Continuum: A State-of-Practice Survey,” arXiv.org. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2506.02003>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [24] Amazon Web Services, “AWS para la periferia: información general.” [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/es/edge/>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [25] Microsoft Azure, “¿Cuáles son los componentes de IoT Edge?” [En línea]. Disponible en: <https://azure.microsoft.com/es-es/products/iot-edge>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [26] Google Cloud, “Google Distributed Cloud conectado.” [En línea]. Disponible en: <https://cloud.google.com/distributed-cloud-connected?hl=es>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [27] IBM, “IBM Cloud.” [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/solutions/cloud>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [28] Alibaba Cloud, “Salesforce on Alibaba Cloud.” [En línea]. Disponible en: <https://www.alibabacloud.com/en/product/salesforce>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [29] Huawei, “CloudEdge.” [En línea]. Disponible en: <https://carrier.huawei.com/en/solutions/cloud-enabled-digital-operations/cloudedge>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [30] Sereno Cloud Solution, “Tencent Cloud.” [En línea]. Disponible en: <https://www.serenoclouds.com/medium-enterprise-clouds/public-clouds/tencent-cloud/>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [31] Red Hat, “El concepto de OpenStack.” [En línea]. Disponible en: <https://www.redhat.com/es/topics/openstack>. [Accedido: 25-nov-2025].

- [32] OpenNebula, “OpenNebula: Open source cloud & edge computing platform.” [En línea]. Disponible en: <https://openebula.io/>. [Accedido: 25-nov-2025].
- [33] P. Pop *et al.*, “The FORA Fog Computing Platform for Industrial IoT,” *Information Systems*, vol. 98, p. 101727, may 2021, doi: 10.1016/j.is.2021.101727.
- [34] A. Willner and V. Gowtham, “Towards a Reference Architecture Model for Industrial Edge Computing,” *ResearchGate*, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/343568442_Towards_a_Reference_Architecture_Model_for_Industrial_Edge_Computing. [Accedido: 18-nov-2025].
- [35] W. Lautenschlaeger, F. Frick, K. Christodoulopoulos, and T. Henke, “A Scalable Factory Backbone for Multiple Independent Time-Sensitive Networks,” *Euromicro Conference on Real-Time Systems*, 2021 doi: doi:10.1016/j.sysarc.2021.102277.
- [36] A. S. George, “The Impact of IT/OT Convergence on Digital Transformation in Manufacturing,” *Partners Universal International Innovation Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 18–38, abr. 2024, doi: 10.5281/zenodo.10895704.
- [37] L. Patera, A. Garbugli, A. Bujari, D. Scotece, and A. Corradi, “A Layered Middleware for OT/IT Convergence to Empower Industry 5.0 Applications,” *Sensors*, vol. 22, no. 1, dic. 2021, doi: 10.3390/s22010190.
- [38] QuestDB, “Master the time-series database (TSDB).” [En línea]. Disponible en: <https://questdb.com/glossary/time-series-database/>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [39] InfluxData, “InfluxDB.” [En línea]. Disponible en: <https://www.influxdata.com/>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [40] TigerData, “TimescaleDB: PostgreSQL time-series database.” [En línea]. Disponible en: <https://www.tigerdata.com/timescaledb>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [41] OpenTSDB, “OpenTSDB.” [En línea]. Disponible en: <https://opentsdb.net/>. [Accedido: 3-dic-2025].

- [42] Prometheus, “Prometheus monitoring system.” [En línea]. Disponible en: <https://prometheus.io/>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [43] ISDI España, “5 herramientas para crear el dashboard perfecto.” [En línea]. Disponible en: <https://www.isdi.education/es/blog/herramientas-para-crear-el-dashboard-perfecto>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [44] Grafana Labs, “Grafana vs. Datadog.” [En línea]. Disponible en: <https://grafana.com/compare/grafana-vs-datadog/>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [45] Microsoft, “Power BI: visualización de datos.” [En línea]. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-es/power-platform/products/power-bi>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [46] Elastic, “Kibana: explora, visualiza y descubre datos.” [En línea]. Disponible en: <https://www.elastic.co/es/kibana>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [47] Inductive Automation, “Perspective: visualization for industrial applications.” [En línea]. Disponible en: <https://inductiveautomation.com/ignition/modules/perspective>. [Accedido: 3-dic-2025].
- [48] Universal Robots, “Redes industriales: qué son, principales tipos y su utilidad,” sep. de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.universal-robots.com/mx/blog/redes-industriales-que-son-principales-tipos-y-su-utilidad/>. [Accedido: 27-may-2025].
- [49] Precision, “La evolución de las redes industriales,” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://blog.precision.tech/cl/redes-industriales/la-evolucion-de-las-redes-industriales>. [Accedido: 27-may-2025].
- [50] Emerson, “Redes de nivel de campo.” [En línea]. Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/training-engsch-buses-101-es-es-41570.pdf>. [Accedido: 27-may-2025].
- [51] Acciomate SpA, “Protocolos de comunicación industrial: tipos y aplicaciones,” 12 de ene. de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.acciomate.com/post/protocolos-de-comunicaci%C3%B3n-industrial-tipos-y-aplicaciones>. [Accedido: 23-oct-2025].

[52] Sicma21, “Redes de comunicación industrial: todo lo que necesitas saber,” 22 de abr. de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.sicma21.com/que-son-las-redes-de-comunicacion-industrial/>. [Accedido: 2-jun-2025].

[53] Aula21, “Modbus: qué es y cómo funciona,” 5 de may. de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/modbus-que-es-y-como-funciona/>. [Accedido: 23-oct-2025].

[54] Tecnología Maisvch, “Los 10 principales protocolos de automatización industrial,” 25 de oct. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://maisvch.com/es/blog/cuales-son-los-10-principales-protocolos-de-automatizacion-industrial/>. [Accedido: 23-oct-2025].

[55] Siemens, *SIMATIC: programar con STEP 7*, 2010. [En línea]. Disponible en: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/107/45531107/att_91666/v1/s7pr___d.pdf. [Accedido: 3-nov-2025].

[56] Adiro, “MPS PA Compact Workstation,” 2025. [En línea]. Disponible en: <https://adiro.com/en/didactic/solutions/products/mps-pa-compact-workstation.php>. [Accedido: 30-nov-2025].

[57] Festo, “MPS PA Compact Workstation,” 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.festo.com/us/en/p/mps-pa-compact-workstation-id_PROD_DID_8162603/. [Accedido: 30-nov-2025].

[58] A. Al-Dulaimy et al., “The computing continuum: From IoT to the cloud,” *Internet of Things*, vol. 27, p. 101272, oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101272>.

[59] B. Lydon, “RAMI 4.0 reference architectural model for Industrie 4.0,” *ISA*, 31 de ene. de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr> [Accedido: 24-oct-2025].

- [60] Geprom. “Monitorización Industrial”. Geprom. [En línea]. Disponible en: <https://www.geprom.com/diccionario/monitorizacion-industrial/#:~:text=La%20monitorización%20industrial%20permite%20obtener,d e%20posibles%20problemas%20o%20desviaciones>. [Accedido: 2-jun-2025].
- [61] Wezen, “Monitoreo en tiempo real, 5 software open source,” Wezen. [En línea]. Disponible en: <https://www.wezengroup.com/monitoreo-en-tiempo-real-5-productos-open-source/>. [Accedido: 2-jun-2025].
- [62] HEIDELBERG, “Predictive Monitoring,”. [En línea]. Disponible en: https://www.heidelberg.com/global/en/services_and_consumables/digital_services/predictive_monitoring_1/predictive_monitoring_1.jsp#:~:text=Predictive%20Monitoring%20is%20a%20cloud,your%20customers%20and%20their%20jobs. [Accedido: 3-jun-2025].
- [63] Neuvition “Sistemas de monitoreo remoto a distancia,” [En línea]. Disponible en: <https://www.neuvition.com/es/neuvition-remote-monitoring-systems/>. [Accedido: 3-jun-2025].
- [64] Endress+Hauser, “Liquicap T FMI21 capacitive level measurement.” [En línea]. Disponible en: https://bdi-download.endress.com/file/005056A5E3831EDBB8DDE618B014713E/TI393FEN_0510.pdf. [Accedido: 5-dic-2025].
- [65] Endress+Hauser, “Thermophant T TTR31,” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.endress.com/>. [Accedido: 5-dic-2025].
- [66] Endress+Hauser, “Process pressure: pressure switch for safe measurement and monitoring.” [En línea]. Disponible en: <https://www.amsequipment.com/wp-content/uploads/2018/04/Ceraphant-T-PTC31-PTP31-PTP35.pdf>. [Accedido: 5-dic-2025].
- [67] Siemens, “Subject to change without notice,” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/4ed5/0900766b81397276.pdf>. [Accedido: 5-dic-2025].

[68] J. Martínez, “Qué es InfluxDB y primeros pasos,” OpenWebinars.net. [En línea]. Disponible en: <https://openwebinars.net/blog/que-es-influxdb-y-primeros-pasos/>. [Accedido: 5-dic-2025].

[69] J. Martínez, “Qué es Grafana y primeros pasos,” *OpenWebinars*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://openwebinars.net/blog/que-es-grafana-y-primeros-pasos/>. [Accedido: 5-dic-2025].

[70] J. Fuentes, “Despliegue multinodo de Openstack Newton en centos 7 con Rodo y componente Magnum,” 2015. [En línea]. Disponible en: <https://dit.gonzalonazareno.org/gestiona/proyectos/2015-16/proyecto-integrado-JAF.pdf>. [Accedido: 10-dic-2025].

ANEXOS

Anexo A. Diagrama de conexión MPS-PA

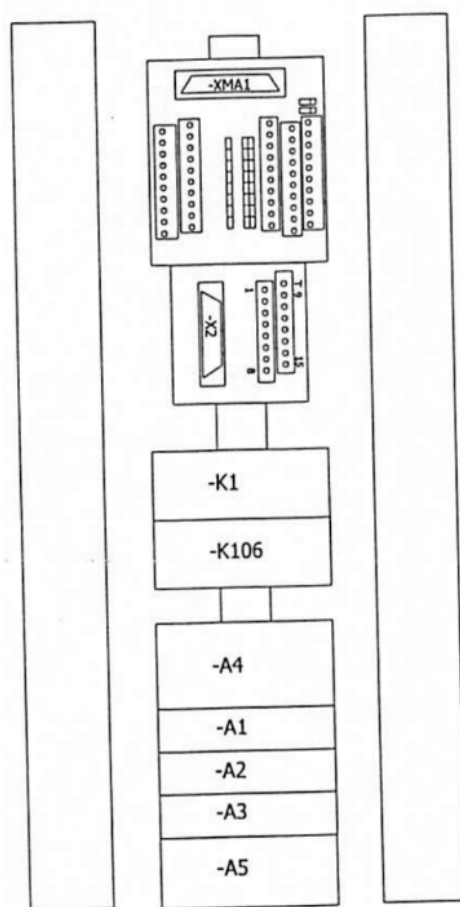


Figura 29. Layout / MPS-PA Compact Workstation.

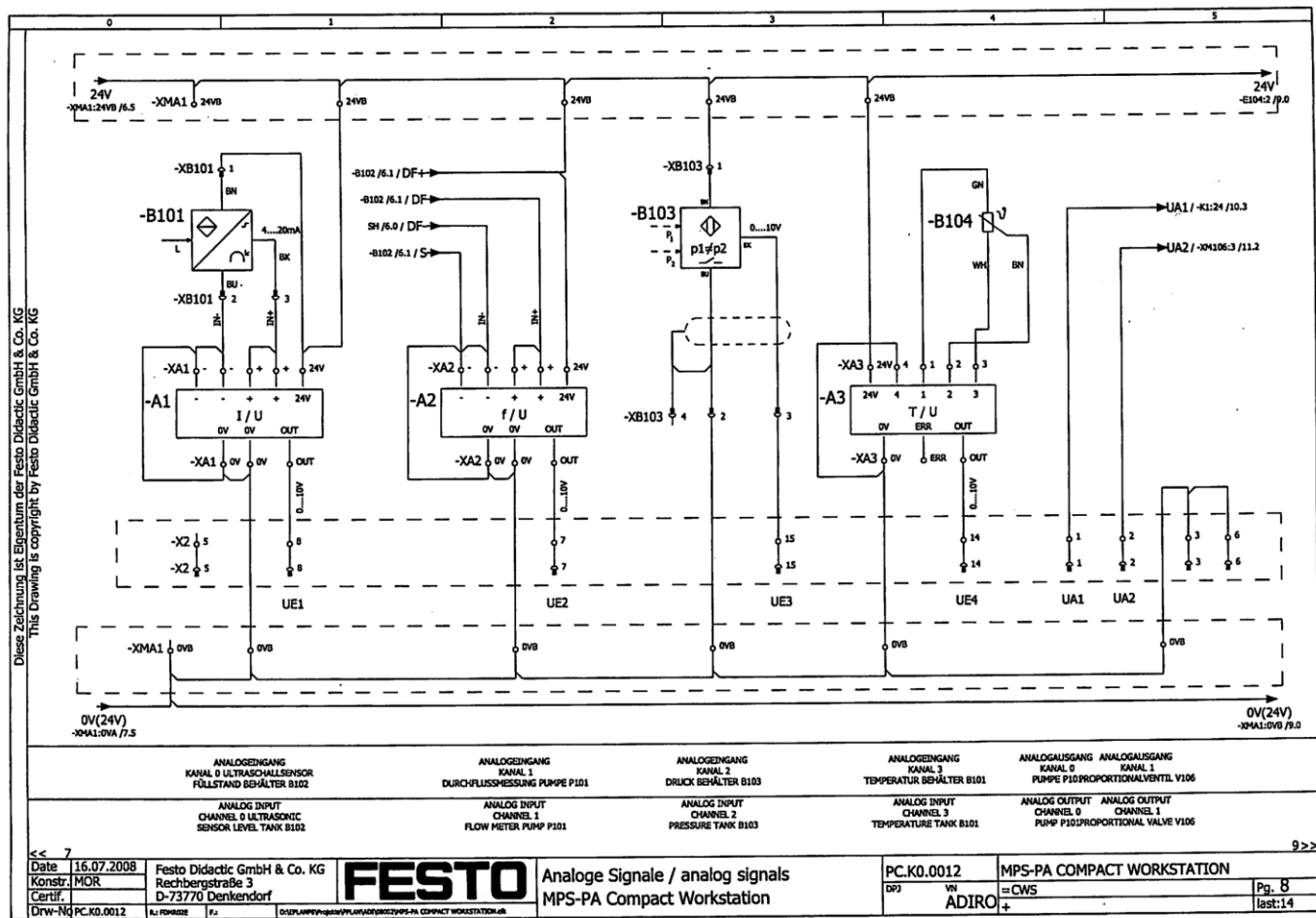


Figura 30. Analog signals / MPS-PA Compact Workstation.

Anexo B. Programación en TIA Portal V15.1

Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

Nod_red_s7_2 / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

Main [OB1]

Main Properties

General							
Name	Main	Number	1	Type	OB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
Temp			
Constant			

Network 1:

Network 2:

Network 3:

Figura 31. Programación en el Main PLC1.

Totally Integrated Automation Portal					
--------------------------------------	--	--	--	--	--

Nod_red_s7_2 / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

conversion_voltaje [FB1]

conversion_voltaje Properties							
General							
Name	conversion_voltaje	Number	1	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writeable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Sensor_1	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
Sensor_2	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
Valor_Es_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Valor_Es_2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
Salida_Voltaje_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Salida_Voltaje_2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Salida_Sensor_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Salida_Sensor_2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
VL_Nor_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
VL_Nor_2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:

Network 2:

Figura 32. Normalización y Escalamiento PLC1.

Totally Integrated Automation Portal									
Nod_red_s7_2 / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks									
conversion_voltaje_DB [DB2]									
conversion_voltaje_DB Properties									
General									
Name	conversion_voltaje_DB	Number	2	Type	DB	Language	DB		
Numbering	Automatic								
Information									
Title		Author		Comment		Family			
Version	0.1	User-defined ID							
Name	Data type	Start value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writeable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Sensor_1	Int	0	False	True	True	True	False		
Sensor_2	Int	0	False	True	True	True	False		
Valor_Es_1	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Valor_Es_2	Real	0.0	False	True	True	True	False		
▼ Output									
Salida_Voltaje_1	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Salida_Voltaje_2	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Salida_Sensor_1	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Salida_Sensor_2	Real	0.0	False	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
VL_Nor_1	Real	0.0	False	True	True	True	False		
VL_Nor_2	Real	0.0	False	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
Nod_red_s7_2 / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / PLC tags / Tabla de variables estándar [41]									
PLC tags									
	Name	Data type	Address	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Supervision	Comment
⏏	Tag_1	Bool	%Q0.0	False	True	True	True		
⏏	Entrada_DG_1	Bool	%I0.0	False	True	True	True		
⏏	Tag_4	Int	%MW10	False	True	True	True		
⏏	Entrada_DG_2	Bool	%I0.1	False	True	True	True		
⏏	Tag_6	Int	%MW12	False	True	True	True		
⏏	Tag_7	Real	%MD100	False	True	True	True		
⏏	Tag_8	Real	%MD120	False	True	True	True		
⏏	Tag_9	Word	%IW64	False	True	True	True		
⏏	Tag_10	Real	%MD300	False	True	True	True		
⏏	Tag_11	Real	%MD320	False	True	True	True		
⏏	Tag_12	Int	%IW66	False	True	True	True		
⏏	Tag_13	Real	%MD340	False	True	True	True		
⏏	Tag_14	Real	%MD360	False	True	True	True		

Figura 33. Etiquetas PLC1.

Totally Integrated Automation Portal					
--------------------------------------	--	--	--	--	--

Nod_red_s7_2 / PLC_2 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

Main [OB1]

Main Properties

General					
Name	Main	Number	1	Type	OB
Numbering	Automatic				
Information					
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment	
Version	0.1	User-defined ID		Family	

Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
Temp			
Constant			

Network 1:

Network 2:

Network 3:

Figura 34. Programación en el Main PLC2.

Totally Integrated Automation Portal							
--------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

Nod_red_s7_2 / PLC_2 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

conversion_voltaje [FB1]

conversion_voltaje Properties

General							
Name	conversion_voltaje	Number	1	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writ-able from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
Sensor_1	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
Valor_Es_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
Salida_Voltaje_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Salida_Sensor_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
VL_Nor_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:

The diagram illustrates the logic for Network 1, which performs normalization and scaling. It consists of three function blocks:

- NORM_X (Int to Real):** Takes *#Sensor_1* as input. The *MIN* value is 0 and the *MAX* value is 27648. Its output is *#VL_Nor_1*.
- SCALE_X (Real to Real):** Takes *#VL_Nor_1* as input. The *MIN* value is 0.0 and the *MAX* value is 10.0. Its output is *#Salida_Voltaje_1*.
- SCALE_X (Real to Real):** Takes *#Valor_Es_1* as input. The *MIN* value is 0.0 and the *MAX* value is 10.0. Its output is *#Salida_Sensor_1*.

Figura 35. Normalización y Escalamiento PLC2.

Totally Integrated Automation Portal		
Nod_red_s7_2 / PLC_2 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks conversion_voltaje_DB [DB2]		
conversion_voltaje_DB Properties		
General		
Name	conversion_voltaje_DB	Number 2 Type DB Language DB
Numbering	Automatic	
Information		
Title		Author Comment Family
Version	0.1	User-defined ID
Name	Data type	Start value Retain Accessible from HMI/OPC UA Writable from HMI/OPC UA Visible in HMI engineering Setpoint Supervision Comment
▼ Input		
Sensor_1	Int	0 False True True True False
Valor_Es_1	Real	0.0 False True True True False
▼ Output		
Salida_Voltaje_1	Real	0.0 False True True True False
Salida_Sensor_1	Real	0.0 False True True True False
InOut		
▼ Static		
VL_Nor_1	Real	0.0 False True True True False

Totally Integrated Automation Portal		
Nod_red_s7_2 / PLC_2 [CPU 1214C DC/DC/DC] / PLC tags / Tabla de variables estándar [41] PLC tags		
PLC tags		
Name	Data type	Address Retain Accessible from HMI/OPC UA Writable from HMI/OPC UA Visible in HMI engineering Supervision Comment
Tag_1	Bool	%Q0.0 False True True True
Entrada_DG_1	Bool	%I0.4 False True True True
Tag_4	Int	%MW10 False True True True
Entrada_DG_2	Bool	%I0.5 False True True True
Tag_6	Int	%MW12 False True True True
Tag_7	Real	%MD100 False True True True
Tag_8	Real	%MD120 False True True True
Tag_9	Word	%IW64 False True True True
Tag_10	Real	%MD300 False True True True
Tag_11	Real	%MD320 False True True True
Tag_12	Int	%IW66 False True True True
Tag_13	Real	%MD340 False True True True
Tag_14	Real	%MD360 False True True True

Figura 36. Etiquetas PLC2.

Anexo C. Monitoreo del Servidor físico

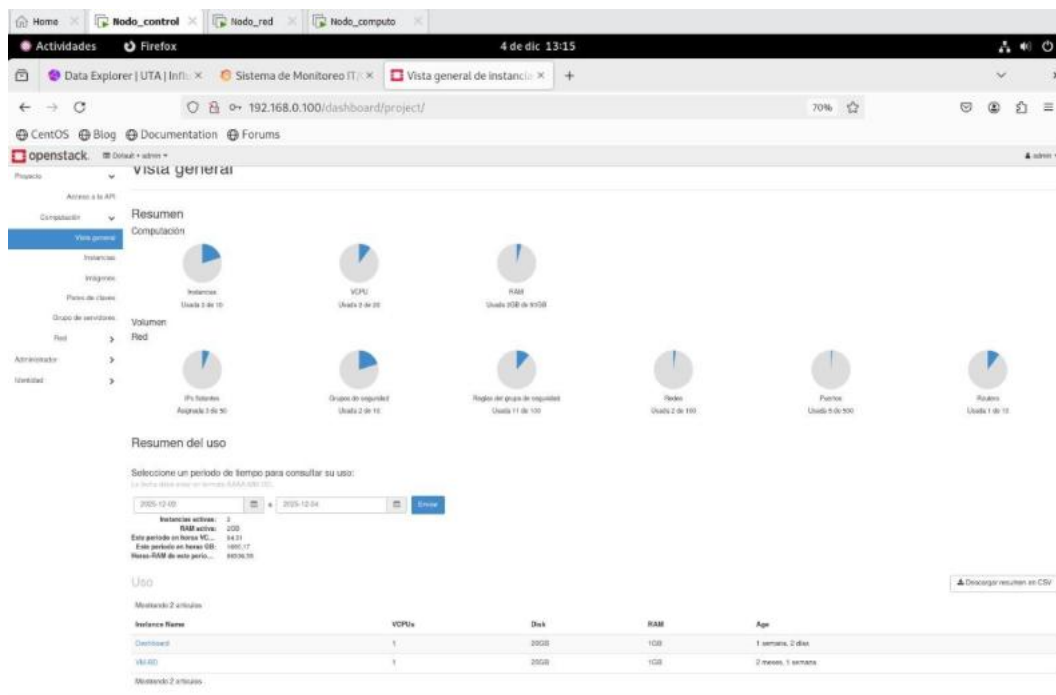


Figura 37. Resumen del estado del servidor Openstack junto con sus instancias.

Anexo D. Programación para realizar las pruebas de estrés.

```
import time                                     # Métricas globales

import json                                     # -----

import random                                   latencias = []

import argparse                                 mensajes_enviados = 0

import paho.mqtt.client as mqtt                mensajes_confirmados = 0

from statistics import stdev, mean

tiempos_envio = {}

# -----
```

```

def on_publish(client, userdata, mid):
    global mensajes_confirmados

    if mid in tiempos_envio:
        rtt = (time.time() -
tiempos_envio[mid]) * 1000 # ms

        latencias.append(rtt)

        mensajes_confirmados += 1

        del tiempos_envio[mid]

def main(broker_ip, sensores,
intervalo, duracion):
    global mensajes_enviados

    client = mqtt.Client()

    client.on_publish = on_publish

    client.connect(broker_ip, 1883, 60)

    client.loop_start()

    print(f"Iniciando prueba con
{sensores} sensores por
{duracion/60:.1f} minutos...")

    inicio = time.time()

ultimo_segundo = inicio

while (time.time() - inicio) <
duracion:

    # Simular N sensores

    for sensor_id in range(sensores):

        payload = {

            "sensor": sensor_id,

            "valor": random.uniform(0,
100),

            "ts": time.time()

        }

        topic =
f"stress/sensor/{sensor_id}"

        mid = client.publish(topic,
json.dumps(payload), qos=1)[1]

        tiempos_envio[mid] =
time.time()

        mensajes_enviados += 1

    time.sleep(intervalo)

```

```

client.loop_stop()

client.disconnect()

print("\n----- RESULTADOS --
-----")

print(f"Mensajes   enviados:
{mensajes_enviados}")

print(f"Mensajes   confirmados
(ACK): {mensajes_confirmados}")

print(f"Pérdida:   {100   -
(mensajes_confirmados/mensajes_en
viados*100):.2f}%")

if latencias:

    print(f"Latencia   media:
{mean(latencias):.2f} ms")

    print(f"Jitter   (STDEV):
{stdev(latencias):.2f} ms")

    print(f"Latencia   mínima:
{min(latencias):.2f} ms")

    print(f"Latencia   máxima:
{max(latencias):.2f} ms")

```

Guardado CSV

```

with open("resultados_mqtt.csv",
"w") as f:

    f.write("latencia_ms\n")

    for l in latencias:

        f.write(f"{l}\n")

    print("\nArchivo   generado:
resultados_mqtt.csv")

if __name__ == "__main__":

    parser =
    argparse.ArgumentParser()

    parser.add_argument("--broker",
required=True)

    parser.add_argument("--sensores",
type=int, required=True)

    parser.add_argument("--intervalo",
type=float, default=0.1) # 10
mensajes por segundo cada sensor

    parser.add_argument("--duracion",
type=int, default=1800) # 30 min

    args = parser.parse_args()

    main(args.broker, args.sensores,
args.intervalo, args.duracion)

```