

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**IMPLEMENTACIÓN DE REDES SEGURAS
EN ENTORNOS CRÍTICOS.
INSTRUMENTACIÓN, BUSES DE CAMPO Y
MEDIOS DE TRANSMISIÓN.**

(Implementing Secure Networks in Critical
Environments. Instrumentation, Fieldbuses
and Transmission Media)

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Víctor Manuel Linares Gutiérrez

Julio - 2025

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Víctor Manuel Linares Gutiérrez

Director del TFG: Adolfo Cobo García

Título: "Implementación de redes seguras en entornos críticos. Instrumentación, buses de campo y medios de transmisión"

Title: "Implementing secure networks in critical environments. Instrumentation, fieldbuses and transmission media"

Presentado a examen el día: 3_ de julio de 2025

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Valle López, Luis

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús María

Vocal (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, Antonio

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos (80/20)

María, Manuela y Diego, lo importante de mi vida; habéis puesto muchas horas en esto.

A los amigos que están, sorprendentemente a pesar de mí, están.

A profesores como quien me ha dirigido el TFG, a sus compañer@s de departamento y a todos aquellos que a lo largo del grado me han dedicado su tiempo. Reconozco y agradezco vuestra profesionalidad y rigor.

A la dirección de la escuela y a la Universidad de Cantabria por el valor que aporta a la sociedad y por el orgullo de pertenencia que genera, gracias.

Viajar acompañado no solo hace el camino más llevadero, sino que lleva a mejores destinos y eso en esta etapa ha sido evidente.

Dedicado

Pilar & Faustino – LUX AETERNA

Resumen

La digitalización de infraestructuras y la automatización industrial son esenciales para responder a las demandas de eficiencia, seguridad y sostenibilidad en un entorno en constante evolución. En este contexto, la Agenda 2030 y normativas como la Directiva NIS2, ISO 50001 e IEC 62443 exigen la integración de sistemas más conectados y seguros, garantizando la operatividad y fiabilidad de infraestructuras críticas.

Este trabajo analiza, mediante un caso de uso real, estrategias para la medición de magnitudes, la automatización y la gestión de instalaciones industriales. Se aborda la importancia de los buses de campo y la segmentación de redes en entornos OT (Tecnología operacional), para diseñar arquitecturas robustas y conformes con las regulaciones vigentes. Además, se destaca el papel de la transformación digital y el análisis predictivo en la optimización de procesos, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave

Integración de sistemas, infraestructuras críticas, automatización industrial, arquitectura de red OT, ciberseguridad, eficiencia energética, directiva NIS2.

Abstrac

The digitalization of infrastructures and industrial automation is crucial to meet the growing demands for efficiency, safety, and sustainability in an ever-evolving environment. In this context, frameworks such as the 2030 Agenda, along with regulations like the NIS2 Directive, ISO 50001, and IEC 62443, emphasize the need for integrating more connected and secure systems to ensure the operability and reliability of critical infrastructures.

This Bachelor's Thesis seeks to analyze, through a real-world case study, strategies for measuring key parameters, automating processes, and managing industrial facilities. It explores the importance of fieldbuses and network segmentation in Operational Technology (OT) environments, focusing on the design of resilient architectures that comply with current standards. Additionally, it underscores the role of digital transformation and predictive analytics in optimizing processes, contributing to the advancement of the Sustainable Development Goals.

Key words

System integration, critical infrastructures, industrial automation, OT network architecture, cybersecurity, energy efficiency, NIS2 directive.

Lista de acrónimos

OT (Tecnología Operacional)

PLC (Controladores Lógicos Programables)

PAC (Controlador de Automatización Programable)

SCADA (Supervisión Control y Adquisición de Datos)

DCS (Sistemas de Control Distribuido)

CEM (Compatibilidad Electro Magnética)

IO-Link (Interfaz de Comunicación de Bajo Nivel para Dispositivos Inteligentes)

PROFINET (Protocolo de Comunicación Industrial Siemens basado en Ethernet)

PROFIBUS (Bus de Campo de Procesos de Siemens)

Smart Grids (Redes Eléctricas Inteligentes)

SSI (Interfaz Síncrona en Serie)

NIS2 (Directiva sobre Seguridad de las Redes y los Sistemas de Información 2)

EPBD (Directiva sobre el Rendimiento Energético de los Edificios)

OSI (Interconexión de sistemas abiertos)

LAN (Red local)

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)

IEC (International Electrotechnical Commission)

Índice General

1. Introducción

- 1.1. Motivación
- 1.2. Objetivo
- 1.3. Disposición del trabajo

2. Estado del arte

- 2.1. Electrónica, Electricidad y Buses de Campo
- 2.2. Instrumentación y Sensores.
- 2.3. Control de Procesos. Controladores, PLC/SCADA/DCS.
- 2.4. Robótica.
- 2.5. Comunicaciones industriales.
- 2.6. Informática, bases de datos, redes OT y ciberseguridad
- 2.7. Normativa
- 2.8. Protocolos de Comunicación y Automatización

3. Casos de uso

- 3.1. Servicio
- 3.2. Medidas en accionamientos
- 3.3 Arquitectura de red industrial segura según NIS2.
- 3.4 Control de iluminación DALI en red OT según NIS2

4. Conclusiones y líneas futuras

Índice de figuras

Figura 1. Pirámide de automatización.....	XI
Figura 2. La perturbación electromagnética.....	XIII
Figura 3. AMS 100i sistema de posicionamiento laser.	XX
Figura 4. Cableado PNP 3 hilos.	XXI
Figura 5. Cableado NPN 3 hilos.	XXI
Figura 6. Cableado sensor 4-20 ma.	XXI
Figura 7. Cableado sensor Voltaje alterno.	XXI
Figura 8. Informe de Forense Industrial S.L.	XXVII
Figura 9. Certificado de calibración de uno de los equipos. Cámara termográfica FLIR E85.	XII
Figura 10. esquema técnico que muestra el recorrido de las perturbaciones.	XL
Figura 11. SIPLUS CMS2000 VIB-Sensor de medida de vibración S01.	XLI
Figura 12. Evolución de las amplitudes de las tres magnitudes de vibración.	XLI
Figura 13. Soporte magnético del fabricante Unceta y puntos de instalación.	XLIII
Figura 14. Estado de los cables Profibus DP y conexiones a la salida del variador.	XLIII
Figura 15. Medida de la calidad de comunicación del bus Profibus DP.	XLIV
Figura 16. Medida de intensidad del campo eléctrico 1708 mW/cm ²	XLIV
Figura 17. Malla de conexión a tierra 35 mm ² . 200 mm orificio (M6). I _{max} 195 A.	XLV
Figura 18. Cable de tierra a sustituir por la malla arriba indicada.	XLV
Figura 19. Cable de tierra a sustituir por malla como la arriba indicada.	XLVI
Figura 20. Medida de la corriente que circula por la máquina herramienta, una correcta protección a tierra minimiza esta corriente.	XLVI
Figura 21. Sistema AEGIS.	XLVII
Figura 22. Tensión en el rodillo que genera arcos eléctricos y deterioro del cojinete.	XLVII
Figura 23. SIPLUS CMS2000 VIB-Sensor de medida de vibración S01.	LII
Figura 24. Evolución de las amplitudes de las tres magnitudes de vibración.	LIV
Figura 25. Zonificación de red según NIS2.	LIX

Índice de tablas

Tabla 1. Magnitud y causa de la vibración.	XXXII
Tabla 2. Comparativa orientativa.	XXXIII
Tabla 3. Instrumentos de medida usados en el diagnóstico.	XXXVIII
Tabla 4. Comparativa técnica – Latencia y Viabilidad en Redes Industriales.	XLIX
Tabla 5. Magnitud y causa de la vibración.	LIII
Tabla 6. Tipos de sensores y aplicaciones típicas.	LV
Tabla 7. Requisitos y como los cumplimos.	LVII
Tabla 8. Cumplimiento NIS2 en el sistema de iluminación.	LX

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Nos encontramos en un momento de transformación acelerada en la industria y las infraestructuras, impulsado por la digitalización, la sostenibilidad y la creciente presión normativa. La incertidumbre global, marcada por crisis económicas, conflictos geopolíticos y avances tecnológicos disruptivos lo cual obliga a estos y otros sectores a adaptarse con rapidez para garantizar su competitividad. En este contexto, Europa ha definido un marco regulador que, alineado con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Agenda 2030, busca garantizar eficiencia, seguridad y resiliencia en la actividad económica que a la postre garantiza hoy y a futuro nuestra forma de vivir.

La transición hacia modelos industriales más sostenibles y digitales es un desafío complejo que requiere la adopción de tecnologías avanzadas, así como el cumplimiento de normativas clave en ciberseguridad, eficiencia energética y gobernanza. Como señala **Josu Ugarte Arregui, presidente de Zona Ibérica de Schneider Electric**, esta transformación se desarrolla en un entorno caracterizado por la interacción de **cuatro macrotendencias globales**:

“La complejidad actual la habían generado cuatro grandes fuerzas globales o macrotendencias que habían estado interactuando unas sobre otras a una velocidad nunca vista y a las que se han unido los últimos fenómenos de la policrisis: pandemia, guerras, falta de materiales, transporte, crisis energética...”

Esas cuatro grandes macrotendencias son la globalización (en la que incluyo la geopolítica, la evolución de las clases medias, el reto demográfico y la urbanización), la revolución digital (la existencia de un mundo híbrido: físico y digital, en el que la IA aparece como una disrupción enorme), la expansión del conocimiento (internet, nativos digitales...) y la emergencia climática (circularidad, descarbonización y aceleración de las normativas por parte de la UE). Estas fuerzas globales interactúan entre sí, generando dilemas y paradojas y aspectos pluridimensionales (países, sectores, personas, impactos sociales, económicos, de salud) que cambian a una velocidad desconocida, generando una incertidumbre y una ansiedad nunca vistas anteriormente.” (Ugarte Arregui, 2004, P.2).

Este panorama obliga a la industria e infraestructuras a adoptar un modelo basado en la digitalización, automatización e integración de datos, facilitando no solo la optimización de procesos y la reducción de costos, sino también el cumplimiento de exigencias regulatorias que garanticen la sostenibilidad y la seguridad.

Normativas clave en la transformación industrial y de infraestructuras

Para avanzar en este nuevo paradigma, la transformación digital y la automatización de infraestructuras críticas deben ir acompañadas del cumplimiento de normativas que garanticen seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

En el ámbito de la ciberseguridad, la Directiva **NIS2** y la norma **IEC 62443** establecen requisitos para proteger redes en infraestructuras e industria de sus sistemas y procesos, reforzando la resiliencia ante amenazas.

En términos de gestión energética, normativas como **ISO 50001** y **EN 15232** promueven la eficiencia en edificios e instalaciones industriales, alineándose con los ODS. Además, el Reglamento **(UE) 2019/2023** y la Directiva **EPBD (2010/31/UE)** impulsan la interoperabilidad y la digitalización en la automatización de infraestructuras.

Por otro lado, certificaciones internacionales como **BREEAM** y **LEED** se consolidan como referencias en la evaluación de sostenibilidad ambiental de edificios, aportando criterios objetivos para reducir el impacto ambiental y optimizar el ciclo de vida de las construcciones.

Asimismo, la protección de datos en entornos digitales es clave, con la norma **ISO/IEC 27001** estableciendo estándares para la gestión segura de la información, especialmente en sectores estratégicos como son Energía, Telecomunicaciones, Defensa, Sanidad, Transporte, Finanzas, Agua y alimentación.

El cumplimiento de estas normativas no solo garantiza la conformidad legal, sino que también facilita la transición hacia modelos más eficientes, sostenibles y competitivos. En un escenario donde Europa debe posicionarse frente a mercados como Asia o EE.UU., la adopción de tecnología por sí sola no basta; es esencial una planificación estratégica respaldada por profesionales cualificados que lideren la integración de estos sistemas. En este contexto, cabe destacar la versatilidad del graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación para adaptarse a los requerimientos de estos planes gracias a los conocimientos tanto fundamentales como otros más específicos que adquiere a lo largo de la carrera.

La importancia de la digitalización en infraestructuras críticas

Las infraestructuras críticas, como hospitales, plantas industriales, centros de datos o estaciones de transporte han experimentado una evolución significativa en los últimos años. Tradicionalmente, su diseño y mantenimiento se basaban en criterios arquitectónicos, eléctricos o hidráulicos.

Hoy en día, la automatización y la digitalización, junto con los avances en inteligencia artificial, se han convertido en elementos clave para garantizar su operatividad, seguridad y resiliencia. La IA aporta capacidades predictivas, optimiza el mantenimiento preventivo y facilita la toma de decisiones en tiempo real, incrementando la eficiencia y reduciendo riesgos. En el caso concreto de un hospital, la tecnología debe asegurar aspectos como la continuidad asistencial, la monitorización de instalaciones críticas (climatización, quirófanos, esterilización), la gestión inteligente de la energía y la protección de datos sensibles de los pacientes, todo ello manteniendo los más altos estándares de disponibilidad y seguridad. Si mantenemos como ejemplo un hospital, la tecnología debe asegurar:

- Sistemas de seguridad y control de accesos para el personal, pacientes y visitantes, protegiendo tanto las personas como las zonas críticas del centro sanitario.
- Conectividad en tiempo real que permita, por ejemplo, realizar operaciones quirúrgicas asistidas de forma remota o colaborar con especialistas externos.

- Monitorización energética y de recursos, utilizando inteligencia artificial para optimizar consumos, detectar anomalías y reducir el impacto ambiental.
- Gestión automatizada de suministros, mejorando la logística interna y evitando roturas de stock en materiales vitales.
- Sistemas predictivos de mantenimiento, basados en IA, que anticipen fallos en equipos médicos o instalaciones, garantizando su disponibilidad en todo momento.

En el sector industrial, la combinación de automatización, telecomunicaciones y analítica avanzada permite optimizar procesos productivos, mejorar la trazabilidad de los datos y garantizar una respuesta ágil ante cualquier imprevisto. Tecnologías como el análisis en tiempo real y los algoritmos predictivos facilitan la planificación, la calidad y la eficiencia en la fabricación.

Sin embargo, el éxito de esta transformación no depende únicamente de la inversión en infraestructura tecnológica, sino también de la formación continua y la especialización del talento humano, capaces de liderar la integración de estos sistemas y adaptarlos a las necesidades reales del negocio.

Formación y gobernanza en la transformación digital

Uno de los mayores retos de la digitalización es la escasez de personal capacitado para gestionar la implementación y el mantenimiento de estas tecnologías. Muchas empresas carecen de un plan de gobernanza sólido, lo que impide una integración efectiva de las nuevas infraestructuras digitales. Es fundamental que las organizaciones cuenten con profesionales especializados en telecomunicaciones e ingeniería, capaces de diseñar arquitecturas de red seguras y eficientes.

En este sentido, el **grado en Ingeniería de Telecomunicaciones** se presenta como una formación clave para la digitalización de las instalaciones técnicas tanto en el sector terciario como en la industria. Estos profesionales poseen los conocimientos necesarios para:

- Diseñar redes de comunicación adaptadas a entornos críticos.
- Diseñar sistemas de medida y captación de información a medida de la necesidad.
- Implementar medidas de ciberseguridad conforme a normativas internacionales.
- Optimizar el suministro eléctrico de los sistemas automatizados.
- Garantizar la interoperabilidad de dispositivos y plataformas digitales.

El éxito de la transformación digital radica en la capacidad de las empresas para adoptar soluciones tecnológicas con un enfoque estratégico. Existen diferencias significativas entre la simple digitalización de procesos y una verdadera transformación digital. Muchas organizaciones invierten en tecnología sin una planificación adecuada, lo que genera ineficiencias, sobrecostes y riesgos operativos.

Este TFG analizará, mediante un caso de uso real, la implementación de estrategias de digitalización en infraestructuras críticas. Se estudiará la medición de magnitudes, la automatización y la segmentación de redes OT, abordando los protocolos de comunicación y el diseño de arquitecturas seguras. La correcta integración de estas tecnologías permitirá no solo optimizar procesos y garantizar la resiliencia de las infraestructuras, sino también cumplir con las normativas vigentes y contribuir al cumplimiento de los ODS.

En un mundo donde la incertidumbre es la norma, las empresas que apuesten por la digitalización estratégica y el talento especializado serán las que logren una ventaja competitiva y sostenible en el tiempo.

1.2 Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo definir los puntos en de interés o calientes a tener en cuenta tanto para al diseño como mantenimiento de infraestructuras críticas, centrándose en los tres primeros niveles de la pirámide de automatización. A través de casos de uso reales, fundamentalmente uno de ellos, se analizará la implementación de estrategias de digitalización, incluyendo la medición de magnitudes, la automatización y la segmentación de redes OT.

Se considerarán los protocolos de comunicación óptimos y el diseño de arquitecturas seguras para garantizar la integración eficiente de estas tecnologías, optimizar procesos y reforzar la resiliencia de las infraestructuras. Además, se abordará el cumplimiento normativo y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Desde la perspectiva de las telecomunicaciones, este trabajo también ofrecerá una visión integradora, sirviendo de enlace entre distintas disciplinas en entornos críticos.

Vamos a identificar los siguientes campos de actuación

Instrumentación y Sensorización. En entornos industriales, la mayoría de las máquinas herramienta, así como los sistemas y dispositivos en infraestructuras, suelen estar equipados con sensores y capacidades de comunicación. En estos casos, la instrumentación ya está integrada, reduciendo la necesidad de diseñarla desde cero por el usuario final, sin embargo, es fundamental comprender su funcionamiento y los principios de medición en los que se basan.

Este conocimiento permite garantizar un mantenimiento adecuado y verificar que la instrumentación opera correctamente. Cuando sea necesario instrumentar una parte del proceso o de la instalación, será imprescindible identificar los valores a medir y seleccionar los medios más adecuados para capturar y tratar esos datos con precisión.

Automatización. En la mayoría de los casos, es altamente probable que los equipos presentes en una instalación cuenten con un microprocesador, controlador parametrizable o PLC de libre configuración encargado de su gestión. Estos dispositivos pueden ser mantenidos por técnicos especializados o directamente por el fabricante del equipo, especialmente cuando se considera su funcionamiento a nivel de celda o área. No obstante, estos controladores no operan de manera aislada, sino que se comunican con otros semejantes, dispositivos de interacción hombre-máquina (HMI) o controladores específicos de la instalación permitiendo una gestión integral y eficiente del sistema.

Comunicación. Al establecer la comunicación entre equipos en redes OT, es fundamental aplicar una segmentación diferente a la utilizada en entornos IT. En el ámbito IT, la segmentación suele basarse en criterios como el tipo de usuario, los servicios o la

distribución por plantas. Sin embargo, en entornos OT, resulta más adecuado segmentar por celdas o áreas, ya que este enfoque permite aislar posibles fallos y evitar que una incidencia en una celda detenga por completo la producción. De manera análoga, si en un entorno IT se segmenta por planta, en una planta de producción sería más eficiente segmentar por línea de producción para minimizar el impacto de cualquier interrupción.

Supervisión. Dentro de la pirámide de automatización, existe un nivel destinado a la gestión de la información generada en planta o edificio. Este nivel suele estar conformado por sistemas como DCS, SCADA o BMS, los cuales recopilan, procesan y supervisan los datos operativos. A partir de estos sistemas, la información es transferida a un nivel superior, donde se gestiona la producción y se integra con la red IT. De este modo, los departamentos de gestión y dirección pueden acceder a los datos relevantes para la toma de decisiones estratégicas y operativas.

1.3 Disposición del trabajo

Este trabajo se desarrollará en tres capítulos adicionales, además del presente. El objetivo principal es destacar la relevancia de las telecomunicaciones en cada nivel de la pirámide de automatización, la cual se basa en una infraestructura de comunicaciones sólida, con buses de campo seguros y normativas que garantizan la fiabilidad y la ciberseguridad de los procesos industriales y de infraestructuras críticas.

A continuación, se presentan los capítulos:

Capítulo 2. Estado del arte

Este capítulo analiza la evolución de las telecomunicaciones aplicadas a la automatización industrial y de infraestructuras críticas, centrándose en los sistemas de transmisión de datos, buses de campo y normativas de seguridad. Se revisa el desarrollo de los sistemas de comunicación, desde las primeras soluciones cableadas, como **Modbus-RTU** y **Profibus**, hasta las redes actuales, que incluyen Ethernet industrial, buses de campo y protocolos como **Profinet**, **Modbus-TCP**, **BACnet**, **KNX**, **DALI**, etc. Todos estos sistemas se basan en la comunicación de capa de enlace de datos según el modelo OSI (Open Systems Interconnection), lo que permite la transmisión de datos a través de una red local (LAN). Además, gestionan el acceso a los medios mediante protocolos como **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) y regulan cómo los dispositivos comparten el canal de comunicación para evitar colisiones.

Además, se abordan las recomendaciones de organismos como la IEC (International Electrotechnical Commission) y normativas como la NIS (Network and Information Security), que buscan garantizar la ciberseguridad en infraestructuras críticas y sectores estratégicos. La evolución de los buses de campo también se contextualiza en el marco de la Industria 4.0, Smart Building Automation y la conectividad IIoT (Industrial Internet of Things).

Capítulo 3. Caso de uso.

Las actividades y relaciones laborales que llevo acometiendo los últimos 20 años me permiten tener relación con la industria de la provincia al igual que con proveedores y fabricantes de tecnología, esto me ayuda a adaptar en muchos casos la oferta a la demanda, llevando la labor de una mera venta o recomendación de equipos a la venta

de una solución fruto de una venta consultiva. En este capítulo vamos a exponer como ejemplo una serie de demandas y actuaciones relacionadas con estos aspectos que se han llevado a cabo en una empresa local y una solución propuesta a otra empresa para el control digital de la iluminación de 5 túneles que se debe de gestionar desde un SCADA superior.

Las demandas y actuaciones que se han atendido forman parte de una reciente ampliación en esta fábrica por lo que se han visto obligados a mejorar sus instalaciones y adaptarlas a los nuevos sistemas y demandas. Fundamentalmente hemos abordado asuntos relacionados con la consultoría, medida e integración de nuevas magnitudes gracias a nueva instrumentación, integración en el sistema de automatización de procesos e integración con un sistema de supervisión SCADA a nivel superior. En el caso de los túneles, se han proyectado mejoras en la instalación eléctrica de MT y BT, añadiendo medidas de consumo en determinados circuitos y control de la iluminación.

Caso de uso Fábrica

Instrumentación a nivel de campo

Durante el proceso de ampliación de la fábrica, se identificó la necesidad de incorporar nueva instrumentación para poder medir y controlar nuevas magnitudes, en concreto la medida de vibración y temperatura en los motores eléctricos; también, con el mismo objetivo de optimizar inversión y consumo, se optó por integrar un sistema de control para regular el consumo de la iluminación en función de la luminosidad natural y presencia. Esto implicó seleccionar sensores y dispositivos adecuados que pudieran integrarse con los sistemas existentes. Para implementar ambos casos, se utilizaron soluciones de comunicación los buses de campo (**Profinet**, **KNX** y **DALI**) además tecnologías de comunicación **Wifi**, lo que permitió una recopilación de datos precisa y eficiente. Además, se tuvo en cuenta la seguridad de la transmisión de datos, cumpliendo con normativas clave que garantizan la protección de redes industriales.

Automatización y comunicación a nivel de control

El nivel de control está compuesto por dispositivos como **PLCs** y controladores que procesan la información recopilada a nivel de campo. La comunicación en esta capa se realiza principalmente mediante buses de campo de alta velocidad y redes industriales basadas en **Ethernet (Profinet, Modbus-TCP, EtherNet/IP)** lo que permitió optimizar la automatización de procesos. La elección de estos protocolos, junto con la implementación de medidas de seguridad conforme a normativas como la **IEC 61131** y **NIS**, aseguró que las comunicaciones dentro de la planta fueran rápidas y seguras, minimizando riesgos en la operación.

Comunicación a nivel de supervisión

Para ofrecer un control y monitoreo efectivo de los procesos industriales, se implementaron sistemas de supervisión como **SCADA**, que permiten gestionar toda la planta a nivel superior. Estos sistemas se integraron con la infraestructura existente mediante redes de comunicación de alta capacidad, como **Profinet** y **Ethernet industrial**, lo que asegura un manejo ágil de grandes volúmenes de datos. Además, se adoptaron estándares de seguridad para proteger la información sensible y garantizar la integridad de las comunicaciones dentro del sistema de supervisión.

Capítulo 4. Conclusiones.

Las conclusiones derivadas de los casos de uso presentados refuerzan la figura del graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación como un profesional clave para afrontar los retos del mercado laboral actual.

En sectores como la producción industrial, las infraestructuras críticas y el ámbito del retail y automatización de edificios, cada vez más condicionado por normativas centradas en la eficiencia energética y la sostenibilidad, la disponibilidad de datos y la implementación de sistemas de control avanzados resultan esenciales. Solo mediante una gestión técnica adecuada es posible desarrollar estrategias de mantenimiento preventivo que garanticen la continuidad operativa y el rendimiento óptimo de las infraestructuras.

Se propondrán nuevas posibilidades en el campo de la prescripción técnica, donde el ingeniero en telecomunicaciones puede aportar valor mediante soluciones eficaces de medida y comunicación, en concreto en los aspectos que ha tratado este TFG, medición de energía y calidad eléctrica, la integración de sistemas de monitorización de vibraciones y el control de infraestructuras que no requieren sincronismo, tanto en entornos industriales como en edificios del sector terciario.

Una gobernanza empresarial orientada a la calidad, que reconozca la necesidad de contar con profesionales versátiles y con alta capacidad de adaptación, se traduce en una ventaja competitiva clara. Pero esta visión debe estar respaldada por un liderazgo firme y comprometido, capaz de atraer, desarrollar y retener talento en un entorno en constante transformación.

Las organizaciones que fomentan una cultura de liderazgo inclusivo, innovación y aprendizaje continuo no solo optimizan su rendimiento, sino que también se consolidan como entornos atractivos para los perfiles más cualificados. En este contexto, el ingeniero en telecomunicaciones se posiciona como un agente estratégico clave, no solo por su conocimiento técnico, sino por su capacidad de conectar sistemas, personas y procesos. Su perfil polivalente le permite acometer labores técnicas e incluso liderar con solvencia los retos tecnológicos actuales y anticiparse a los desafíos futuros con visión sistémica y orientación a resultados.

Capítulo 2: Estado del arte

En este capítulo vamos a exponer como la automatización industrial y de infraestructuras ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsada por el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones, la mejora en la integración de sensores y controladores, y la adopción de protocolos de comunicación estandarizados. En este capítulo analizamos la evolución de las telecomunicaciones aplicadas a la automatización, con especial énfasis en los sistemas de transmisión de datos, buses de campo y posteriormente las normativas relacionadas con la ciberseguridad.

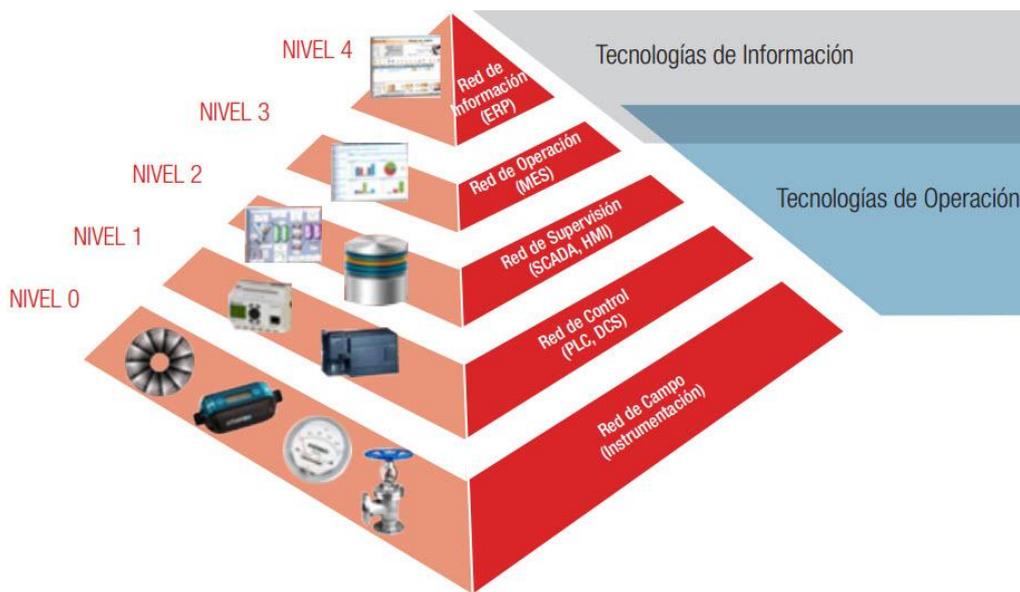


Figura 1. Pirámide de automatización [1]

En los tres primeros niveles de la pirámide de automatización, también conocidos como tecnologías de operación, se encuadran los materiales y especialidades que conviene conocer para abordar con solvencia la planificación, gestión y mantenimiento de una instalación automatizada. Ni que decir tiene que un experto no conoce el 100% de la oferta de sensores, controladores, lenguajes de programación, manejo de softwares, etc., si debe tener una formación o base que le permita profundizar en alguno de estos niveles y conocer el nivel posterior o anterior.

¿Qué conceptos debería conocer un técnico integrador de estos sistemas en base a que es muy probable que en algún momento deberá de acometer labores al respecto?

Respecto a conceptos:

- Electrónica, Electricidad y Buses de Campo
- Instrumentación y Sensores.
- Control de Procesos. Controladores, PLC/SCADA/DCS.
- Robótica.
- Comunicaciones industriales.
- Informática, bases de datos, redes OT y ciberseguridad
- Normativa

Respecto a labores que probablemente tenga que acometer:

- Diseñar e implementar instalaciones.
- Conocer el proceso, para automatizarlo de la forma óptima.
- Elegir los equipos e instrumentos que se adecúen más a la instalación.
- Documentar proyectos, planos, esquemas eléctricos, programación, etc.
- Mantenimiento, modificaciones y mejoras de la instalación.

Para explicar las soluciones actuales usamos como índice los puntos definidos en, conocimientos que se deberían de tener.

2.1 Electrónica, Electricidad y Buses de Campo

El conocimiento en electricidad y electrónica es esencial para el diagnóstico y reparación de fallos en equipos de medición, controladores, motores eléctricos, variadores de frecuencia y sistemas de distribución eléctrica. Un aspecto crítico en este campo y muy relacionado con la titulación es la medida, como medir y que instrumentos de medida son los más idóneos en cada situación. A lo largo de los cuatro cursos de esta titulación nos acompaña el uso de herramientas de programación tanto para procesar señales de información como para programar equipos, quizá sea habitual pensar en un graduado en ingeniería industrial como el perfil idóneo para este tipo de cometidos, no obstante, el graduado en ingeniería de telecomunicación lleva intrínseca la necesidad de programar con la finalidad de medir y analizar. A la hora de medir y comunicar en un entorno crítico con total probabilidad nos vamos a encontrar con fenómenos electromagnéticos que aportan ruido al sistema, complica la medida e incluso deteriora las instalaciones; a partir de este momento es donde se ponen en valor los conocimientos de electrónica para determinar equipos, electricidad para asegurar un suministro de energía eléctrica eficaz y que bus de campo vamos a usar. Se considera importante conocer el concepto de **compatibilidad electromagnética (CEM)**, la cual está regulada por normativas internacionales, cumplir CEM garantiza el correcto funcionamiento de dispositivos en entornos críticos con altos niveles de interferencia electromagnética. Las normativas definen la compatibilidad electromagnética (CEM) como “la aptitud de un dispositivo, aparato o sistema para operar de manera satisfactoria en su entorno electromagnético, sin generar perturbaciones electromagnéticas intolerables para otros dispositivos dentro del mismo entorno”.

Una perturbación electromagnética es cualquier fenómeno electromagnético que pueda afectar el rendimiento de un dispositivo, equipo o sistema. Estas perturbaciones pueden manifestarse como ruido electromagnético, señales no deseadas o alteraciones en el medio de propagación.

Como su nombre indica, la perturbación electromagnética está compuesta por un campo eléctrico ($E^{\vec{}}$), generado por una diferencia de potencial (V), y un campo magnético ($H^{\vec{}}$), originado por la circulación de corriente (I) a través de un conductor.

Las perturbaciones electromagnéticas parásitas no son más que señales eléctricas no deseadas que se suman a la señal útil. Estas pueden propagarse de dos formas:

- Por conducción, a través de los propios conductores.
- Por radiación, mediante el aire.

Comprender estos conceptos es esencial para diseñar instalaciones eléctricas que minimicen interferencias y garanticen el rendimiento óptimo de los equipos de medida y control. [2]

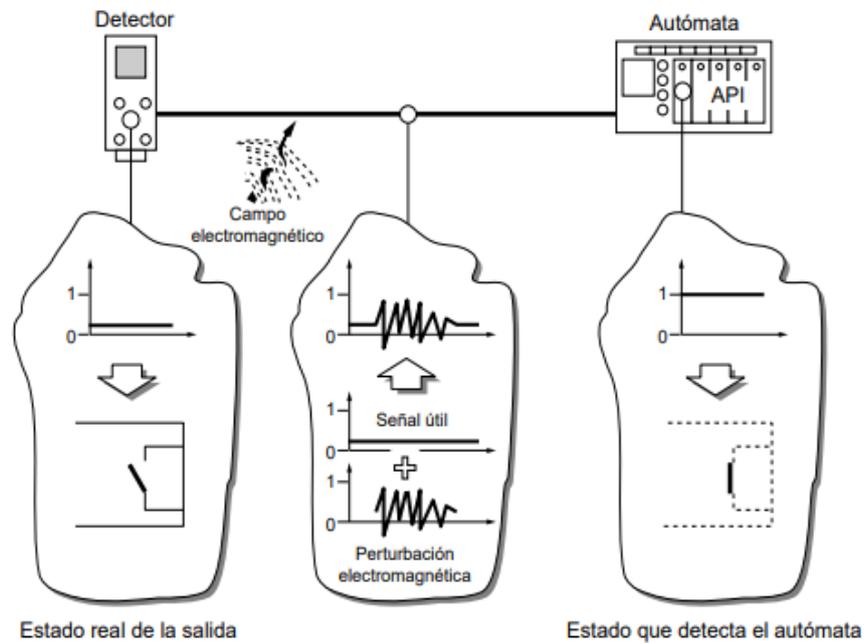


Figura 2. La perturbación electromagnética [2]

Como ya he indicado, en base a la importancia que suponen estas interferencias es necesario conocer como alimentar y cablear sensores y los buses de campo en el nivel cero o campo. Cabe destacar que en la actualidad la existencia de buses de campo en el nivel cero de la pirámide de automatización es residual, no obstante, cada vez hay más sensórica que comunica en este nivel. En el ámbito de las comunicaciones industriales, los buses de campo han sido fundamentales para la integración de sensores y actuadores en sistemas de control. Aunque en la actualidad el uso de buses de campo en el nivel de campo de la pirámide de automatización es menor, tecnologías como **PROFIBUS**, **PROFINET** e **IO-Link**, el cual se ha hecho con un hueco en la industria ya que permite una comunicación bidireccional con los sensores y los controladores. Podemos obtener la información necesaria para realizar una correcta instalación acudiendo a la norma **IEC 61158** de la comisión electrotécnica internacional que describe las comunicaciones de datos de medición y control e indica cual y como debe de ser el medio adoptado.

Cabe destacar por su extendido uso el bus de campo **PROFIBUS** y protocolo **PROFINET**, tecnologías de comunicación industrial desarrolladas por Siemens y mantenidas por **PI (PROFIBUS & PROFINET International)**.

PROFIBUS (Process Field Bus) es un bus de campo cuya comunicación es serie, basada en RS-485 o fibra óptica. Cuenta con dos protocolos, **PROFIBUS DP** (para automatización rápida) y **PROFIBUS PA** (para procesos industriales). Se usa para interconectar PLCs, sensores y actuadores en redes industriales cableadas. Ofrece una velocidad de Hasta 12 Mbps.

PROFINET (Process Field Network), no es un bus, es una red Industrial Ethernet, por lo tanto, la comunicación está basada en Ethernet estándar (TCP/IP y UDP). Cuenta con dos protocolos, **PROFINET RT** (tiempo real) y **PROFINET IRT** (tiempo real isócrono). Su amplio posicionamiento en el mercado hace que se le conozca como el bus que se usa para transformar las fábricas en fábricas inteligentes, con automatización avanzada. Ofrece una velocidad de hasta 100 Mbps o más.

Diferencias clave: PROFIBUS es serie (bus de campo clásico), mientras que PROFINET usa Ethernet, ofreciendo más velocidad y flexibilidad para la Industria 4.0.

IO-Link es un protocolo de comunicación serie punto a punto diseñado para la conexión de sensores y actuadores inteligentes. A diferencia de un bus de campo, que permite la comunicación entre múltiples dispositivos en una red, IO-Link establece una comunicación directa entre un maestro y varios dispositivos esclavos (sensores a nivel de campo y actuadores a nivel de control), permitiendo el intercambio de datos de estado, diagnóstico y configuración de manera sencilla y estandarizada.

2.2 Instrumentación y Sensores

No es difícil suponer que en un proceso industrial al igual que en una infraestructura se toman cientos de medidas y cada una de ellas en base a una situación física determinada. En edificios es necesario medir la temperatura de un fluido al pasar por una tubería para una buena gestión del clima, conocer los consumos en diferentes puntos de la instalación para así poder plantear actuaciones para reducir consumos energéticos y los costes que estos suponen y tener un registro que permita optimizar la instalación, disponer de un sistema de control de acceso y CCTV que aporte seguridad a la instalación y gestión de las personas que lo usan, etc. Generalmente en entornos industriales, en mayor o menor medida se contemplan las necesidades antes indicadas, pero en proceso se toman muchas más medidas y con diferentes tipos de detalle o exigencia, generalmente en lo que se refiere a sincronismo.

Cuando se accede a la documentación del fabricante vemos que todos definen la automatización en infraestructuras como control de edificio mientras que en la industria se define como automatización industrial. Esto genera una disyuntiva que en muchas ocasiones desemboca en discusión en lugar de intentar comprender el motivo por el que se opta por diferenciar ambos sectores, en definitiva, se tiende a crear diferencias, como si un sector fuera mejor o requiera de personal más cualificado que otro cuando eso no es así. A mi modo de ver el sector industrial tiene una necesidad intrínseca prácticamente en todas las partes de la pirámide de automatización que es el sincronismo, la necesidad de trabajar en tiempo real mientras que el edificio en gran medida no requiere de esa necesidad. Pongamos un ejemplo, si no contamos con sincronismo en un proceso que gestiona varios accionamientos que desplazan piezas por una línea de producción, en los robots que trabajan sobre la producción pueden producirse fallos de producción que deterioren la calidad del producto o bien producirse un fallo en el proceso que pare la línea, eso genera gastos de varios tipos. En un edificio no necesitamos conocer en tiempo real la medida de un caudal o el nivel y temperatura al que se encuentra un depósito, tampoco es vital regular la iluminación de una zona determinada del edificio unos segundos antes o más tarde, ni contar con un registro de milisegundos en los sistemas de

seguridad. Son entornos diferentes pero ambos exigentes solo difieren en el número y tipo de necesidades.

La instrumentación juega un papel clave en la automatización, proporcionando datos en tiempo real que permiten optimizar los procesos productivos y mejorar el mantenimiento predictivo, preventivo y prescriptivo. La correcta selección y calibración de sensores garantiza la fiabilidad de las mediciones, lo que impacta directamente en la calidad del producto final.

Los sensores se pueden clasificar en:

Sensores Todo-Nada: Proporcionan una señal binaria (encendido/apagado) en función de la detección de un evento o condición específica. Su información es mínima, ya que basta con un bit para determinar el estado del sensor. Ejemplos comunes, interruptores de proximidad, sensores inductivos, finales de carrera y pulsadores.

Sensores de Salida Continua: Emiten una señal proporcional a la variable medida, permitiendo un monitoreo más preciso. La señal puede ser analógica o digital, y su resolución depende del tipo de sensor y del sistema de adquisición de datos. Por ejemplo, los sensores de temperatura, presión, caudal y vibración.

Los sensores se basan en diferentes tecnologías dependiendo de la magnitud a medir.

Sensores de Contacto Directo: Estos sensores requieren contacto físico con el objeto o el medio a medir. Se emplean en aplicaciones donde se necesita una medición directa de variables como presión, temperatura o vibración. Algunos ejemplos incluyen:

- Sensores de presión mecánicos.
- Termopares y RTDs para medición de temperatura.
- Sensores de caudal con elementos mecánicos.
- Sensores de vibración en motores y maquinaria industrial.

Sensores de No Contacto: Estos sensores detectan variables sin necesidad de contacto físico, lo que minimiza el desgaste y permite mediciones en condiciones difíciles o peligrosas. Ejemplos de esta categoría son:

- **Antenas RFID:** Para identificación y rastreo de objetos sin necesidad de línea de visión.
- **Detectores fotoeléctricos y láser:** Usados en aplicaciones de detección de objetos, posicionamiento preciso y medidas más específicas como vibraciones.
- **Cámaras infrarrojas y ópticas:** Empleadas en control de calidad, monitoreo térmico y vigilancia industrial.
- **Cámaras de vibración:** Para análisis de estructuras mecánicas y mantenimiento predictivo.

Sensores IP y Redes de Comunicación: Con la evolución de la industria 4.0, se han desarrollado sensores con conectividad IP para integración en redes industriales. Algunos ejemplos incluyen:

- **Sensores de medida de magnitudes y avance de proceso,** que evalúan por ejemplo temperaturas, vibraciones y el avance de la producción utilizando antenas WiFi.

- **Protocolos de comunicación en edificio** como BACnet/IP y LoRaWAN, utilizados para integrar sensores en infraestructuras de automatización.
- **Sensores con comunicación PROFINET y PROFIBUS**, como los sistemas de posicionamiento láser AMS 100i de Leuze, que ofrecen medición precisa con una interfaz de comunicación integrada, la gama AMS 100i de posicionamiento ofrecen una precisión absoluta de medición verificada de ± 2 mm a ± 5 mm que cuentan con una interfaz SSI conectada en paralelo para ofrecer comunicación PROFINET y PROFIBUS para suministrar directamente datos de posición al control [3]



Figura 3. AMS 100i sistema de posicionamiento laser. [3]

Según el tipo de señal transmitida:

Señales Digitales: Se utilizan en sensores con salidas discretas (todo-nada), digamos que son las más habituales y sencillas, estas pueden ser mecánicas y también electrónicas a través de transistor donde la frecuencia de conmutación puede tomar valores altos para lo que es una conmutación o triac si además gestiona cargas de corriente elevadas.

Pueden clasificarse en:

- **PNP (fuente):** El sensor entrega un voltaje positivo (24 VCC) cuando está activado. [4]

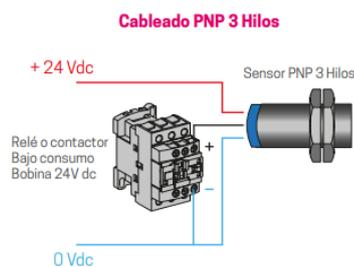


Figura 4. Cableado PNP 3 hilos. [4]

- **NPN (sumidero):** El sensor entrega un voltaje negativo (0 VCC) cuando se activa. [5]

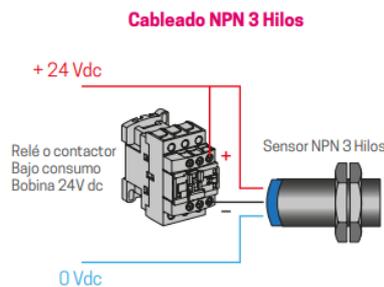


Figura 5. Cableado NPN 3 hilos. [5]

Señales Analógicas: Se emplean en sensores de medición continua y pueden ser:

- **Corriente (4-20 mA):** Sistema robusto para transmisión en largas distancias con alta inmunidad al ruido eléctrico. También permite diagnóstico de fallas, ya que un valor de 0 mA puede indicar un problema de conexión. [6]

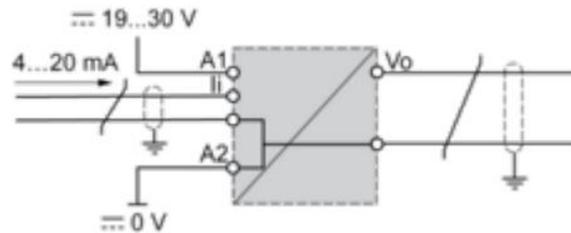


Figura 6. Cableado sensor 4-20 ma. [6]

- **Voltaje alterno:** Utilizado en aplicaciones específicas donde se requiere medición de señales en AC. Es menos inmune al ruido y presenta mayores pérdidas de señal en largas distancias. [7]

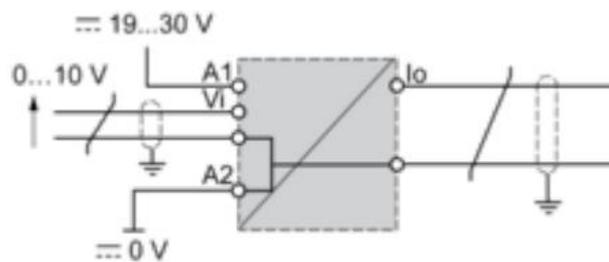


Figura 7. Cableado sensor Voltaje alterno. [7]

Sensores de Alta Frecuencia: Utilizan transceptores piezoeléctricos u ópticos para la medición de señales rápidas, como en el caso de los **encoders**, que permiten medir velocidad y posición en sistemas de automatización.

En función de estas clasificaciones, la selección del sensor adecuado depende de la aplicación, el entorno de operación y los requisitos de precisión y comunicación del sistema de control.

2.3 Control de procesos, controladores PAC/PLC/SCADA/DCS

El control de procesos permite la regulación de variables como temperatura, presión, flujo y nivel dentro de rangos óptimos. Este control se realiza mediante sensores, transmisores y controladores como PLC, sistemas SCADA y sistemas de control distribuido DCS.

En el contexto de la Industria 4.0 y Smart Building, estos sistemas se integran con soluciones basadas en Big Data, IoT y analítica predictiva, permitiendo una supervisión más eficiente y una toma de decisiones basada en datos fehacientes no estimados.

Los controladores programables son la base de la automatización industrial. Se pueden clasificar en:

- **PLC (Controlador Lógico Programable):** Inicialmente diseñados para reemplazar sistemas de relés, evolucionaron para incluir funciones de control analógico y comunicación avanzada.
- **PAC (Controlador de Automatización Programable):** Una versión más avanzada que combina capacidades de PLC con procesamiento de datos y control de movimiento.
- **SCADA (Supervisión Control y Adquisición de Datos):** Sistemas que permiten la supervisión global de una planta, con interfaces gráficas para monitoreo en tiempo real.
- **DCS (Sistemas de Control Distribuido):** Utilizados en plantas de procesos industriales donde el control descentralizado es clave.

La elección entre estos sistemas depende de la complejidad de la aplicación y los requisitos de integración con otros equipos.

2.4 Robótica

La robótica ha transformado la producción industrial, con aplicaciones que van desde el ensamblaje hasta el mantenimiento autónomo. Existen dos categorías principales de robots:

- **Robótica industrial fija:** Robots de alta precisión diseñados para operar de manera autónoma en entornos industriales.
- **Robótica colaborativa (Cobots):** Diseñados para interactuar con operarios humanos en entornos de producción flexible.

En infraestructuras más avanzadas o específicas, la robótica también ha encontrado aplicaciones en sectores como la medicina, con robots quirúrgicos que pueden ser operados de forma remota gracias a las redes de comunicación en tiempo real.

En gran medida los robots se suministran con un servicio de integración y puesta en marcha no siendo necesario para el integrador de planta conocer cómo se programa el robot, pero si conocer cómo y de qué forma se va a comunicar con la fábrica y el resto de los equipos. Puede que necesiten de una red inalámbrica que permita triangula su posición si se trata de un robot colaborativo que se mueva por planta, que permita comunicación ethernet IP o Profinet para compartir datos al control del proceso, etc...

En el ámbito de las infraestructuras, ya existen casos reales de robots colaborativos que permiten realizar intervenciones quirúrgicas de alta precisión. Incluso se han documentado intervenciones llevadas a cabo por equipos de cirujanos ubicados en distintos puntos del planeta, trabajando de forma coordinada como si compartieran la misma sala de operaciones. Esto es posible gracias a sistemas de comunicación deterministas, diseñados para garantizar baja latencia, alta disponibilidad y sincronización precisa. La latencia ultrabaja (a menudo por debajo de 1 milisegundo) es esencial en estos escenarios, ya que cualquier retardo podría comprometer la precisión, la seguridad y los resultados de la intervención.

Estos requisitos no se limitan al ámbito médico. En la industria y las infraestructuras críticas, la posibilidad de operar en tiempo real permite automatizar procesos, responder ante eventos con inmediatez y coordinar múltiples sistemas distribuidos con la fiabilidad que exige un entorno productivo o de misión crítica.

Redes avanzadas de telecomunicaciones como las basadas en 5G, edge computing o tecnologías TSN (Time-Sensitive Networking) se convierten en habilitadoras claves para transformar sectores completos, desde la salud hasta la industria 4.0.

2.5 Comunicaciones Industriales de redes OT

Las redes **OT** (Tecnología Operacional) permiten la comunicación entre dispositivos tanto en entornos industriales como en edificios. Sin embargo, es importante señalar que un edificio no debe integrar sus equipos de automatización de la misma manera que una red **IT** (Tecnología de la Información). En la actualidad, se han registrado casos de ciberataques donde redes mal definidas han causado graves problemas de seguridad, como es el caso de las **Smart Grids**. Por ello, es crucial una correcta segmentación y definición de las redes.

En el ámbito de los edificios, se emplean diversos protocolos de comunicación que garantizan una integración eficiente y segura de los sistemas. Algunos de los protocolos más utilizados en estos entornos incluyen:

- **EtherNet/IP**, usado para la comunicación entre dispositivos de control, presente tanto en industria como en sistemas de automatización en edificios.
- **BACnet**, específicamente diseñado para la automatización de edificios, permite la integración de sistemas como HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), control de iluminación, y otros sistemas de infraestructura del edificio.
- **KNX**, protocolo estándar para la automatización de edificios, que permite el control de climatización, iluminación, accionamientos, sistemas de seguridad y energía. KNX (anteriormente conocido como EIB, European Installation Bus) es un protocolo abierto y estandarizado que permite la interconexión de dispositivos electrónicos dentro de edificios. Fue desarrollado inicialmente en Europa y, debido a su fiabilidad y versatilidad, se ha adoptado a nivel mundial como un estándar para la automatización de edificios. Es mantenido por la KNX Association, que agrupa a fabricantes y desarrolladores de soluciones de automatización, y se utiliza en proyectos residenciales, comerciales e industriales.
- **DALI** (Digital Addressable Lighting Interface) es un protocolo de comunicación digital utilizado principalmente para el control y la gestión de sistemas de iluminación en edificios. DALI es utilizado principalmente para controlar sistemas de iluminación en entornos comerciales y residenciales, ofreciendo una forma eficiente de gestionar la iluminación según necesidades específicas, lo que contribuye a la eficiencia energética y la comodidad de los usuarios.
- **Modbus** y **Modbus-TCP**, ampliamente utilizados en la integración de sistemas de control en entornos industriales y de edificios, especialmente para la comunicación con dispositivos como medidores de energía o sistemas de climatización.

Estos protocolos garantizan la transmisión confiable de datos y la interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes, facilitando la creación de redes eficientes y seguras tanto en la industria como en el ámbito de la gestión de edificios inteligentes.

2.6 Informática, bases de datos y ciberseguridad

La digitalización de la industria ha impulsado la adopción de tecnologías de software para la gestión y análisis de datos en tiempo real. Los sistemas SCADA y BMS dependen de bases de datos como SQL, NoSQL e Historian para almacenar información de procesos. Ya hemos indicado los protocolos que permiten la conectividad entre dispositivos de campo y sistemas de supervisión. Importante destacar protocolos como **OPC UA** y **MQTT**, protocolos clave que juegan un papel clave. Ambas tecnologías permiten la transmisión ligera, segura y fiable de datos entre dispositivos, incluso en entornos con restricciones de ancho de banda o con necesidades de actualización en tiempo real.

Además, la ciberseguridad industrial ha cobrado gran relevancia debido al aumento de ataques dirigidos a infraestructuras críticas. La convergencia entre IT y OT ha generado nuevos desafíos en la protección de redes industriales, lo que requiere la implementación de estándares de seguridad como **IEC 62443** y la directiva **NIS2**.

La digitalización y automatización en la industria han incrementado los riesgos cibernéticos, especialmente en el sector manufacturero el cual forma parte de la economía que está dedicada a la producción de bienes a gran escala, generalmente mediante el uso de maquinaria, herramientas, y mano de obra. Este sector en 2022 fue el más atacado por ransomware, según IBM. Su papel clave en la cadena de suministro y su alta dependencia de la conectividad lo hacen vulnerable, ya que no puede permitirse interrupciones prolongadas.

Históricamente, la ciberseguridad no ha sido prioritaria para la alta dirección, centrada en la innovación y el crecimiento. Esto ha generado falta de estructuras adecuadas para la implementación segura de nuevas tecnologías. La seguridad en la Industria 4.0 requiere inversión y compromiso directivo, no obstante, actualmente es difícil para las empresas contar con profesionales de este perfil, solo las grandes empresas pueden necesitar de un número de horas suficiente como para dedicar un operario a este cometido, aun así existe esta necesidad la cual la empresa abordan con perfiles más polivalentes o con la contratación de especialistas en comunicaciones y ciberseguridad en entornos críticos; una vez más podemos destacar la capacidad de adaptación que tiene el Graduado en Ingeniería de Telecomunicación para acometer este tipo de labor ya que la convergencia entre IT y OT es crucial pero los equipos IT suelen tener conocimientos limitados en el área OT. La Industria 4.0 y las infraestructuras actuales demanda formación integral para detectar y prevenir amenazas, asegurando un entorno seguro en la fabricación y edificio inteligente.

En definitiva, la integración de estas áreas con redes de comunicación es crucial para el funcionamiento moderno de las infraestructuras industriales y de edificios inteligentes. Las redes de comunicación no solo permiten la supervisión y el control remoto de los sistemas, sino que también facilitan el mantenimiento predictivo, la mejora de la eficiencia energética, la reducción de tiempos de inactividad y la optimización de

los procesos en tiempo real. Para el ingeniero mantenedor industrial y de edificios, comprender cómo estos sistemas se interconectan a través de redes es fundamental para garantizar que las operaciones sean eficientes, seguras y sostenibles.

2.7 Normativas y directivas

La automatización industrial avanza hacia la digitalización y conectividad, integrando sensores inteligentes, redes industriales, sistemas de control y ciberseguridad para optimizar procesos y mejorar la eficiencia operativa. La convergencia de sistemas, el uso de inteligencia artificial para mantenimiento predictivo y la mejora de la interoperabilidad son claves para garantizar flexibilidad y sostenibilidad.

Para avanzar en este paradigma, es fundamental cumplir con normativas que regulan la seguridad, eficiencia y gobernanza de sistemas industriales e infraestructuras críticas. Destacan entre ellas:

Directiva NIS2 – Seguridad de Redes y Sistemas de Información

La Directiva NIS2 fortalece las medidas de ciberseguridad en sectores estratégicos y empresas esenciales. Su objetivo es aumentar la resiliencia de los sistemas digitales mediante la gestión de riesgos, la protección frente a ciberamenazas, la respuesta a incidentes y la formación del personal técnico.

- En industria secundaria, se aplica a sistemas SCADA, PLC, sensores conectados e infraestructura OT, que requieren protección contra accesos no autorizados o ataques ransomware.
- En edificio terciario, obliga a aplicar medidas de seguridad en sistemas BMS, control de acceso, HVAC digitalizado, videovigilancia o redes de datos críticos.

Afecta a empresas medianas y grandes que operan infraestructuras esenciales, pero también a entidades más pequeñas si son designadas como críticas por los Estados miembros.

ISO 50001 – Gestión Energética

Esta norma define un marco para establecer sistemas de gestión energética en organizaciones, ayudando a optimizar el uso de la energía, reducir costes operativos y cumplir con objetivos de sostenibilidad ambiental.

- En plantas industriales, es clave para optimizar el consumo de compresores, calderas, motores eléctricos o sistemas de climatización industrial.
- En edificios terciarios, permite reducir consumos energéticos de forma continua mediante automatización, sensores, gestión horaria y control inteligente de instalaciones técnicas.

Contribuye al cumplimiento de los ODS 7 y 13, promoviendo eficiencia y reducción de emisiones.

IEC 62443 – Ciberseguridad en Automatización Industrial

Es el estándar de referencia para proteger sistemas de automatización y control industrial (IACS). Establece roles, zonas seguras, gestión de accesos, segmentación de redes y defensa frente a amenazas persistentes.

- En instalaciones industriales, regula la seguridad de redes OT, controladores, actuadores, HMI y sistemas SCADA.
- En edificios terciarios, aplica a cualquier red técnica que conecte dispositivos críticos como sistemas de seguridad, climatización o acceso remoto.

Es esencial para asegurar la continuidad operativa y la integridad de los procesos técnicos.

IEC 61508 – Seguridad Funcional (SIL)

Es la norma de referencia para diseñar sistemas eléctricos y electrónicos que deben operar con seguridad en situaciones críticas. Introduce el concepto de SIL (Safety Integrity Level), que define niveles de confiabilidad frente a fallos peligrosos.

- En industria secundaria, es esencial en sectores como el químico, energético o petroquímico, donde se emplean sistemas instrumentados de seguridad (SIS).
- En edificios terciarios con funciones críticas, puede aplicarse en estaciones ferroviarias, hospitales o centros de evacuación automática en caso de emergencia.

Garantiza que los sistemas actúen correctamente para prevenir accidentes y minimizar riesgos.

ISO/IEC 27001 – Seguridad de la Información

Define los requisitos para implementar un Sistema de Gestión de Seguridad de la Información (SGSI). Permite identificar, analizar y tratar los riesgos de seguridad asociados a la información digital.

- En ambientes industriales, protege la confidencialidad de los datos operativos y evita fugas de información técnica.
- En edificios terciarios, garantiza la protección de datos sensibles de usuarios, como en hospitales, aeropuertos o centros financieros.

Es especialmente relevante cuando se utilizan plataformas cloud, sistemas IoT o accesos remotos.

EN 15232 – Eficiencia Energética mediante Automatización de Edificios

Esta norma europea clasifica el nivel de eficiencia que puede alcanzarse mediante la automatización y control de instalaciones técnicas.

- En edificios terciarios, permite alcanzar altos niveles de rendimiento energético mediante la gestión inteligente de HVAC, iluminación, persianas, y sistemas de ocupación.
- Aunque su aplicación directa no está pensada para el sector industrial, puede utilizarse en oficinas dentro de plantas o en instalaciones logísticas automatizadas.

Facilita la clasificación energética y la certificación de edificios.

Reglamento (UE) 2019/2023 – Interoperabilidad y Ecodiseño

Este reglamento europeo obliga a los fabricantes y operadores a garantizar la interoperabilidad de los sistemas de automatización, así como el diseño eficiente de productos relacionados con la energía.

- En instalaciones industriales, promueve la conectividad entre diferentes dispositivos y protocolos (por ejemplo, HVAC, iluminación o contadores energéticos).
- En edificios terciarios, apoya la integración entre soluciones técnicas de diferentes fabricantes en una única plataforma de gestión centralizada.

Favorece la digitalización del sector de la construcción y la eficiencia operativa.

Directiva EPBD (2010/31/UE) – Rendimiento Energético de los Edificios

Impulsa la mejora de la eficiencia energética mediante la digitalización, monitorización y automatización de edificios. Requiere certificación energética, estrategias de rehabilitación y tecnologías inteligentes.

- Fundamental en edificios terciarios, especialmente en sectores con grandes superficies como sanidad, educación o administración.
- Promueve el uso de sensores, BMS y herramientas de gestión energética, favoreciendo una operación sostenible.

Certificación BREEAM – Construcción y Explotación Sostenible

BREEAM es un sistema de certificación que evalúa la sostenibilidad ambiental del diseño, construcción y operación de edificios.

- En edificios terciarios, exige sistemas técnicos eficientes y tecnologías de automatización que reduzcan el consumo energético, el uso del agua y las emisiones.
- Requiere gestión avanzada de instalaciones como HVAC, iluminación, ventilación y calidad del aire interior.

Contribuye al valor de mercado y a la imagen de sostenibilidad corporativa.

Certificación LEED – Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental

LEED es una certificación internacional enfocada en edificios sostenibles. Evalúa criterios como eficiencia energética, uso de materiales, calidad ambiental interior y gestión del agua.

- En infraestructuras terciarias, como oficinas, hospitales o centros educativos, exige una integración de tecnologías eficientes que mejoren el rendimiento energético y el confort de los ocupantes.
- Promueve el uso de sistemas automatizados y redes inteligentes para monitorizar el funcionamiento del edificio.

IEEE 802.1X – Control de Acceso en Redes

Este estándar del IEEE regula el acceso seguro a redes mediante autenticación. Permite verificar la identidad de dispositivos o usuarios antes de permitirles conectarse a una red Ethernet o Wi-Fi, utilizando protocolos como EAP (Extensible Authentication Protocol).

- En industria secundaria, protege redes OT frente a accesos no autorizados, especialmente cuando los sistemas SCADA o PLC se comunican por redes IP.
- En edificios terciarios, refuerza la seguridad en redes corporativas, redes BMS o infraestructura de videovigilancia, limitando el riesgo de intrusión en entornos sensibles como hospitales o aeropuertos.

Es clave para implementar una política de Zero Trust en infraestructuras críticas.

Directive 2014/53/EU (RED) – Equipos Radioeléctricos

La Directiva RED establece requisitos de seguridad, compatibilidad electromagnética y uso eficiente del espectro radioeléctrico para equipos inalámbricos.

- En entornos industriales, aplica a sensores, pasarelas IoT, módulos inalámbricos o redes privadas LTE/5G.
- En edificios terciarios, regula dispositivos como routers Wi-Fi, sistemas de alarma inalámbricos, control de accesos por RFID o HVAC inalámbrico.

Garantiza que los dispositivos no interfieran entre sí y sean seguros para el usuario final.

2.8 Protocolos de Comunicación y Automatización

La transformación digital de la industria y los edificios inteligentes requiere una base de comunicación robusta, interoperable y segura. En este contexto, los protocolos de comunicación técnica son esenciales para conectar sensores, actuadores, controladores y plataformas de supervisión, garantizando el intercambio fluido de datos entre dispositivos y sistemas heterogéneos. Estos protocolos permiten la automatización de procesos, la monitorización en tiempo real, la integración IT/OT, y habilitan tecnologías avanzadas como el edge computing, el gemelo digital, o la analítica predictiva. Según el entorno y los requisitos técnicos (tiempo real, interoperabilidad, seguridad, escalabilidad), se utilizan distintos protocolos: industriales, de automatización de edificios o específicos para IoT. La correcta elección e implementación de estos protocolos es clave para:

- Reducir el consumo energético y aumentar la eficiencia operativa
- Garantizar la seguridad funcional y la disponibilidad del sistema
- Facilitar el mantenimiento remoto y la resiliencia frente a fallos
- Asegurar la interoperabilidad entre fabricantes y tecnologías heterogéneas

Entre los más utilizados, destacan protocolos como **OPC UA, MQTT, Profinet, EtherNet/IP, Modbus, BACnet, KNX, DALI, TSN o Profibus**, cada uno con características particulares según el caso de uso, nivel de complejidad y criticidad de la infraestructura.

A continuación, se detallan los principales protocolos empleados en industria secundaria y edificio terciario, con sus características técnicas y su impacto en la seguridad, sostenibilidad y eficiencia de las instalaciones.

OPC UA – Interoperabilidad Segura entre Dispositivos

OPC UA (Unified Architecture) es un protocolo de comunicación independiente del fabricante, diseñado para la interoperabilidad entre dispositivos industriales y sistemas de software. Ofrece conectividad segura, modelado de datos y capacidades de comunicación cliente-servidor y publish-subscribe.

- En industria secundaria, permite la conexión estandarizada entre PLC, SCADA, sensores y plataformas MES o ERP. Es esencial en la Industria 4.0 para la recolección de datos y la toma de decisiones en tiempo real.
- En edificio terciario, se emplea para integrar sistemas BMS, HVAC, iluminación y contadores energéticos de diferentes fabricantes en plataformas de gestión unificada.

Proporciona cifrado, autenticación y control de acceso, lo que lo hace apto para entornos críticos.

MQTT – Comunicación Ligera para IoT Industrial

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo ligero basado en el modelo publish/subscribe, diseñado para entornos con ancho de banda limitado o dispositivos con baja capacidad de procesamiento.

- En industria secundaria, es utilizado para la transmisión eficiente de datos desde sensores IoT, pasarelas o unidades de borde (edge computing) hacia sistemas de supervisión o cloud.
- En edificios terciarios, se emplea en redes de automatización de bajo consumo y dispositivos conectados, como sensores de ocupación, climatización o iluminación.

Gracias a su eficiencia energética y baja latencia, es ideal para entornos distribuidos y sistemas en tiempo casi real.

BACnet – Control de Automatización en Edificios

BACnet (Building Automation and Control Network) es un protocolo estandarizado (ISO 16484-5) diseñado específicamente para la automatización de edificios. Facilita la comunicación entre sistemas de climatización, iluminación, seguridad y gestión energética.

- En edificios terciarios, es ampliamente usado en BMS para integrar HVAC, control de acceso, alarmas técnicas, calidad del aire o eficiencia energética.
- En entornos industriales con áreas terciarias (oficinas, laboratorios, salas blancas), permite la gestión técnica centralizada de confort y consumo.

Favorece la interoperabilidad entre fabricantes y la eficiencia operativa del edificio.

KNX – Automatización Descentralizada de Edificios

KNX es un estándar abierto (EN 50090) para el control de edificios inteligentes, basado en una arquitectura descentralizada. Opera en múltiples medios físicos: par trenzado, radiofrecuencia, IP o Powerline.

- En edificios terciarios, es usado en sistemas de control de persianas, iluminación, climatización, sensores de presencia y monitorización de consumos.
- En instalaciones industriales con áreas de confort o salas técnicas, se utiliza para control flexible de espacios y ahorro energético.

Su configuración distribuida mejora la resiliencia y facilita la escalabilidad de las instalaciones.

DALI – Control Digital de Iluminación

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) es un protocolo específico para la regulación y control individual de luminarias. Permite el direccionamiento y programación de grupos o escenas de iluminación.

- En edificios terciarios, como oficinas, hospitales o centros comerciales, mejora la eficiencia energética y el confort visual mediante la automatización de la iluminación.
- En entornos industriales, puede utilizarse en zonas de trabajo o pasillos donde se requiere iluminación adaptable y eficiente.

Es compatible con protocolos superiores como KNX o BACnet mediante pasarelas.

Modbus / Modbus TCP – Protocolo Industrial Universal

Modbus es uno de los protocolos más antiguos y extendidos para la comunicación entre dispositivos electrónicos. Modbus RTU funciona sobre RS-485, mientras que Modbus TCP lo hace sobre redes Ethernet.

- En industria secundaria, se utiliza en sensores, variadores de frecuencia, PLC, sistemas de pesaje, estaciones remotas, etc. por su simplicidad y robustez.
- En edificios terciarios, se encuentra en contadores energéticos, equipos HVAC o dispositivos de monitorización.

A pesar de su antigüedad, sigue siendo muy usado por su sencillez e integración con sistemas SCADA o BMS.

EtherNet/IP – Comunicación Industrial sobre Ethernet

EtherNet/IP (Industrial Protocol) es una implementación de Ethernet para redes industriales. Utiliza el modelo CIP (Common Industrial Protocol) y permite comunicación en tiempo real entre dispositivos de automatización.

- En industria secundaria, se emplea en líneas de producción, maquinaria, PLCs y robots industriales, facilitando la integración de dispositivos en redes de alto rendimiento.
- En edificios terciarios, se puede usar en soluciones técnicas avanzadas con necesidades de integración IP (por ejemplo, sistemas de control HVAC o elevadores complejos).

Su escalabilidad y compatibilidad con redes IT lo hacen apto para infraestructuras críticas y grandes instalaciones.

Profinet – Comunicación Determinista en Tiempo Real

Profinet es un protocolo industrial basado en Ethernet, desarrollado por PROFIBUS & PROFINET International (PI). Soporta comunicación determinista para aplicaciones que requieren sincronización precisa.

- En planta industrial, permite conectar sensores, actuadores, variadores y sistemas de control de alta disponibilidad y respuesta en tiempo real.
- En edificios terciarios, puede usarse en sistemas de automatización de procesos especiales, como instalaciones de climatización o ventilación crítica (laboratorios, quirófanos, etc.).

Proporciona alto rendimiento, sincronización precisa y diagnóstico avanzado.

Profibus – Comunicación en Bus para Automatización

Profibus es un protocolo de bus de campo ampliamente utilizado en automatización industrial. Opera principalmente sobre RS-485 y permite la conexión de múltiples dispositivos a un único bus de comunicación.

- En industria secundaria, es común en líneas de producción antiguas o robustas, con sensores, actuadores y PLC comunicándose en entornos eléctricos hostiles.
- En edificios terciarios, su uso está en declive, pero puede estar presente en sistemas técnicos heredados de grandes infraestructuras.

Aunque está siendo reemplazado por Profinet, sigue presente en millones de instalaciones.

Time-Sensitive Networking (TSN) – Redes Ethernet Deterministas

TSN es un conjunto de estándares IEEE (como 802.1AS, 802.1Qbv) que permiten la transmisión de datos con sincronización precisa y baja latencia sobre redes Ethernet estándar. Asegura que la información crítica llegue a tiempo.

- En industria secundaria, es fundamental para aplicaciones de control en tiempo real como robótica avanzada, líneas de ensamblaje sincronizadas o monitorización crítica.
- En infraestructuras terciarias críticas (hospitales, quirófanos digitales, centros de datos), garantiza comunicaciones sin retardo entre sistemas vitales.

Es clave para la evolución hacia el determinismo en redes convergentes.

Nº	Nombre / Código	Tipo	Aplicación Principal	Entidad Normativa / Fuente
1	Directiva NIS2 (UE) 2022/2555	Directiva europea	Ciberseguridad en infraestructuras críticas, IT/OT	Unión Europea
2	IEC 62443 (serie)	Norma IEC	Seguridad en sistemas de automatización y control industrial (OT)	IEC – International Electrotechnical Commission
3	OPC UA	Protocolo / Estándar	Comunicación industrial, interoperabilidad, Industria 4.0	OPC Foundation / IEC TR 62541
4	MQTT – ISO/IEC 20922:2016	Protocolo / Norma ISO	Transmisión eficiente de datos en IoT / Industria 4.0	ISO / IEC
5	KNX – EN 50090 / ISO/IEC 14543-3	Norma europea / ISO	Automatización de edificios: iluminación, climatización, energía	KNX Association / CENELEC / ISO/IEC
6	BACnet – ISO 16484	Norma ISO	Integración de sistemas en edificios: HVAC, iluminación, seguridad	ASHRAE / ISO
7	DALI – IEC 62386	Norma IEC	Control de iluminación digital direccionable en edificios	IEC
8	Modbus / Modbus-TCP	Protocolo abierto	Comunicación con dispositivos industriales y de edificio	Modbus Organization
9	PROFINET – IEC 61158 / 61784	Norma IEC	Automatización industrial sobre Ethernet	PROFIBUS & PROFINET International / IEC
10	EtherNet/IP / DeviceNet	Protocolo industrial	Comunicación industrial y de edificios	ODVA (Open DeviceNet Vendors Association)
11	ISO 10218-1 / 10218-2	Norma ISO	Seguridad en robots industriales	ISO
12	ISO/TS 15066	Especificación técnica	Seguridad en robots colaborativos (Cobots)	ISO / RIA (Robotic Industries Association)
13	ISO/IEC 20546:2019	Norma ISO	Big Data – Conceptos generales	ISO / IEC
14	ISO/IEC TR 24028:2020	Informe técnico ISO	Confiabilidad y seguridad en sistemas de IA y analítica predictiva	ISO / IEC

Tabla 1. Magnitud y causa de la vibración.

Relación entre la velocidad de los buses de comunicación y la frecuencia de transmisión

En los sistemas de automatización industrial y de edificios, la velocidad de los buses de comunicación es un parámetro clave, aunque no debe confundirse con la frecuencia efectiva de transmisión de datos. Aunque están relacionadas, existen diferencias esenciales.

- La velocidad del bus (bitrate), expresada en bits por segundo (bps), indica la capacidad máxima del medio físico para transportar datos.
- La frecuencia de transmisión se refiere a cuántos mensajes o paquetes útiles se pueden enviar por segundo, y depende de varios factores.
 - La velocidad del bus.
 - El tamaño de las tramas.
 - El número de dispositivos en la red.
 - El protocolo de acceso y el ciclo de comunicaciones.
 - Las prioridades de los mensajes y la arquitectura de red.

En el entorno OT de este trabajo, conviven diversas tecnologías: Profinet, Profinet sobre WiFi, Modbus TCP, KNX (TP1 e IP), y DALI.

A continuación, se presenta una comparativa orientativa:

Bus / Protocolo	Velocidad típica	Frecuencia de transmisión estimada	Observaciones
Profinet (RT)	100 Mbps	250 μ s – 1 ms	Cíclico, muy rápido, ideal para E/S en tiempo real
Profinet sobre WiFi	54–300 Mbps (teórico)	>1 ms (variable)	Requiere mayor latencia, útil para sistemas móviles
Modbus TCP	10/100 Mbps	2–10 ms (según polling y dispositivos)	Sencillo, muy usado en SCADA y medidores
KNX TP1	9.6 kbps	20–40 ms	Muy utilizado en automatización de edificios
KNX IP	10/100 Mbps	<10 ms	Más rápido, escalable, ideal para integración IT-OT
DALI	1.2 kbps	~10–100 ms	Limitado a iluminación, secuencial y con baja velocidad
BACnet/IP	10/100 Mbps	5–20 ms (depende del tráfico)	Escalable y flexible, ampliamente adoptado en BMS

Tabla 2. Comparativa orientativa.

Mientras Profinet permite ciclos de actualización de E/S de hasta 250 microsegundos, DALI tarda decenas de milisegundos en procesar comandos individuales, ya que solo puede gestionar un mensaje a la vez por bus. KNX TP1, por su parte, es suficiente para tareas de climatización o iluminación, pero cuando se requiere mayor

velocidad o integración con sistemas IT, KNX IP es más adecuado. BACnet/IP ofrece más flexibilidad para integrar HVAC, contadores, climatización y gestión energética en redes abiertas, especialmente en edificios grandes y multisistema.

Diseño de red: segmentación y planificación

La convivencia de buses con distintas velocidades y frecuencias de actualización exige una planificación cuidadosa. Por ejemplo:

- Profinet RT debe priorizarse para procesos industriales críticos, donde la latencia afecta directamente a la producción.
- BACnet/IP y KNX IP pueden coexistir en la misma infraestructura Ethernet, pero deben ir en VLANs separadas para evitar congestión.
- Modbus TCP, aunque flexible, requiere un control estricto del tráfico si se comparten switches con tráfico más sensible.
- DALI y KNX TP1 deben mantenerse como buses separados por su naturaleza física y baja velocidad, y normalmente se integran a través de gateways.

En redes modernas, los conmutadores gestionables, las VLANs y los firewalls industriales permiten aislar los distintos segmentos y garantizar que cada protocolo opere en sus condiciones ideales. La segmentación OT/IT, reforzada por la normativa NIS2, será esencial para combinar eficiencia y ciberseguridad.

La correcta interpretación de la relación entre la velocidad de los buses y su frecuencia de transmisión efectiva permite diseñar infraestructuras más eficientes y fiables. La elección del bus adecuado debe basarse no solo en la velocidad teórica, sino en las necesidades de cada proceso, su criticidad, la escalabilidad deseada y los requerimientos de interoperabilidad. Los profesionales en automatización y telecomunicaciones deben ser capaces de evaluar estas tecnologías en su conjunto, entender sus limitaciones y diseñar arquitecturas que garanticen fiabilidad, rendimiento y seguridad a largo plazo.

Capítulo 3: Casos de uso.

En este capítulo se mostrarán soluciones que ha ofrecido **Selcansa S.A.** relacionadas con lo indicado hasta ahora en este TFG, soluciones que se han aplicado en una industria manufacturera de la provincia. En concreto han sido tres soluciones que se incluyen dentro de un proceso de ampliación de las instalaciones de la empresa.

Puede que a priori, sobre todo el primer caso de uso, no muestre relación con los contenidos teóricos de la carrera, no obstante, a lo largo del capítulo y posteriormente en las conclusiones procuraré empastar los tres casos para mostrarlos como un conjunto en el cual la intervención de un técnico graduado en ingeniería de tecnologías de telecomunicación tiene mucho sentido y cumple con ese perfil que actualmente demandan las empresas para abordar los retos de eficiencia y sostenibilidad que se requiere. Los ejemplos muestran claramente como en un principio la empresa atiende los mantenimientos de forma correctiva y preventiva, necesitando de terceros para definir con exactitud problemas que, aunque los técnicos de fábrica conocen y suponen, no disponen de medios y experiencia como para solucionar con garantías los motivos de muchas de las averías. A medida que se van solucionando estos problemas veremos cómo la empresa invierte en medida y control para transformar la instalación en un proceso digitalizado que permita aplicar mantenimiento predictivos y prescriptivos con la integración de las distintas magnitudes medidas en sistemas avanzados que se encuentran en niveles superiores de la pirámide de automatización, estos sistemas permitirán prescribir acciones en base a tratamiento de señal.

Volviendo a los casos que nos ocupan, la buena evolución de esta empresa ha facilitado que la multinacional a la que pertenece apruebe el presupuesto de un ambicioso proceso de ampliación con el cual la empresa plantea duplicar su cadena de producción. Para ello se contempla de invertir en varias instalaciones de diferentes hábitos. Aprovechando esta inversión la empresa plantea:

- **Servicio:** Tomar medidas correctivas en las comunicaciones de los equipos de control que se deben a interferencias electromagnéticas.
- **Medidas en accionamientos:** Invertir en motores más eficientes energéticamente IE4 e implementar un sistema de monitorización en los mismos en lo que se refiere a tomar medidas de vibración y temperatura para potenciar su gestión de mantenimiento preventivo y predictivo.
- **Control de iluminación:** Implementar un sistema de control de la iluminación de la planta que asegure la iluminación óptima en función de la presencia y de la luminosidad natural que entra en la planta por el lucernario.

3.1 Servicio

Se demanda la intervención de un servicio que proponemos a nuestros clientes usuarios finales, se trata de un servicio de calidad eléctrica y comunicaciones que nace de una venta consultiva tras percibir la gran demanda de la empresa en repuesto de conectores de comunicación profibus para PLC's y variadores de velocidad. El cliente requería principalmente un diagnóstico técnico especializado para resolver problemas

eléctricos y de comunicación que afectaban la fiabilidad de sus procesos industriales, con una visión preventiva y correctiva en base a normativa. El cliente a la postre pretende:

Solucionar problemas intermitentes de comunicación

- **Motivo más probable:** Fallos en la red PROFIBUS DP, posiblemente con paradas de máquina, pérdidas de sincronización entre PLCs, o errores en sensores/actuadores.
- **Interpretación:** El cliente estaba experimentando inestabilidad operativa, especialmente en líneas automatizadas.

Eliminar disparos o fallos en variadores de frecuencia (VDF)

- **Síntomas comunes:** Variadores que se paran o no comunican sin motivo, activación de protecciones por sobrecorriente o error de tierra, sobrecalentamiento en motores.
- **Interpretación:** Querían entender por qué sus VDF y motores sufrían anomalías, y evitar paradas no programadas, que son costosas.

Mejorar la fiabilidad de la instalación eléctrica

- **Indicio clave:** La necesidad de revisar tierras pues se sospecha la presencia de eventos eléctricos no explicados (picos de tensión, fallos de aislamiento, descargas).
- **Interpretación:** El cliente busca prevenir averías graves, posiblemente haya sufrido alguna.

Evitar daños a motores o componentes electrónicos

- **Pistas técnicas:** Se menciona el riesgo de corrientes parásitas en rodamientos, que pueden destruir motores en poco tiempo.
- **Interpretación:** El cliente tenía fallos prematuros en motores, y quería una explicación física para tomar medidas antes de sustituir por equipos nuevos.

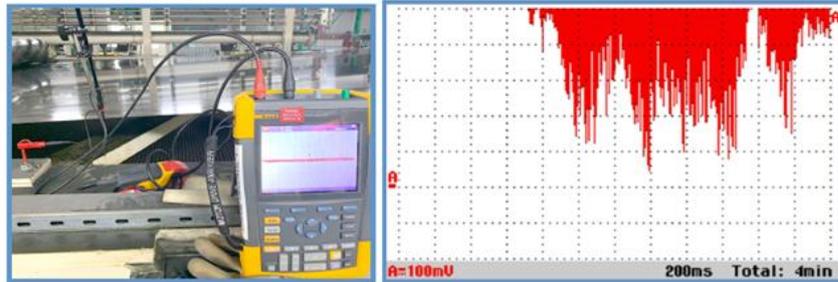
Adecuarse a normativas de CEM y auditorías industriales

- **Posible trasfondo:** Si la planta pertenece a un grupo más grande, puede haber auditorías internas o externas que exijan cumplir con requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC).
- **Interpretación:** Parte del requerimiento puede haber sido regulatorio o de control de calidad, no solo operativo.

Tras hablar con los técnicos de responsables de mantenimiento eléctrico estos nos comentan que tienen problemas con la comunicación de los equipos, que en algunos casos cambiando los conectores esto se soluciona, pero en otros no. Ante este inconveniente se les propone una auditoría con uno de nuestros partner **Forense Industrial S.L.** Una vez acordada la intervención de la empresa se procede a una serie de comunicaciones telefónicas y vía correo para determinar qué tipo de intervención se debe de acometer para encontrar el problema y proponer solución. Finalmente se plantea una intervención de análisis de calidad eléctrica y CEM. Equipotencial entre máquinas y herrajes. Ruido conducido o radiado y revisión de tierras y lazos. Tras la intervención de forense industrial se presenta un informe detallado que incluye las siguientes indicaciones [8].

INFORME

Técnico Forense



Análisis equipotencial, ruidos conducidos e impedancia lazo.

Figura 8. Informe de Forense Industrial S.L. [8]

Fiabilidad de las mediciones e instrumentación utilizada

Con el objetivo de garantizar la máxima precisión y validez técnica de las conclusiones extraídas en el presente informe, el ingeniero responsable ha empleado instrumentación de alta gama específicamente diseñada para el análisis forense de instalaciones eléctricas e industriales. Todos los equipos utilizados están certificados y calibrados por laboratorios de metrología acreditados, lo cual asegura la trazabilidad y conformidad con los estándares internacionales.

Garantía de fiabilidad: Certificación metrológica

Todos los instrumentos mencionados cuentan con certificados de calibración emitidos por laboratorios de metrología registrados, conforme a las normas ISO/IEC 17025. Estos certificados [9] incluyen:

- Fecha de calibración y validez.
- Rango de medición y tolerancias del equipo.
- Firma técnica del laboratorio certificador.
- Número de serie individual para trazabilidad.

Calibration Certificate

Model: InfraCAM™

Serial No. 278015287

Calibration Site: FLIR Systems AB, Sweden

Calibration Date: December 17, 2017

This is to certify that the calibration of the camera identified above is carried out using radiation sources that are traceable to National Standards at the Swedish National Testing and Research Institute (Sweden) or to NIST, National Institute of Standards and Technology (USA).

Peter Olsson
QUALITY ENGINEER



FLIR SYSTEMS AB, P.O. BOX 1705, SE-221 17, MALMÖ, SWEDEN. TEL: +46 40 600 2000. FAX: +46 40 600 2001

Figura 9. Certificado de calibración de uno de los equipos. Cámara termográfica FLIR E85. [9]

Los principales equipos de medida empleados en el diagnóstico son:

Tipo de equipo	Modelo / Marca	Finalidad de uso técnica
Analizador de calidad de energía	Fluke 435-II,	Detección de armónicos, transitorios, desequilibrios de tensión
Reflectómetro y analizador de bus	Softing PROFIBUS Tester 5	Diagnóstico físico y lógico de redes de comunicación industrial
Cámara termográfica	FLIR E85	Detección de sobrecalentamientos en componentes eléctricos
Osciloscopio de altas prestaciones	Tektronix, Rigol	Medición de señales de alta frecuencia y perturbaciones EMI
Medidor de aislamiento y continuidad	Megger MIT400	Verificación de aislamientos y continuidad en mallas de tierra
Pinza amperimétrica de alta resolución	Chauvin Arnoux F607	Medición precisa de corrientes de fuga y desequilibrios de neutro

Tabla 3. Instrumentos de medida usados en el diagnóstico.

Conclusiones a las que llega el técnico de Forense Industrial

Tras el análisis detallado de la instalación, se han identificado diversos problemas técnicos relacionados principalmente con la calidad de la instalación eléctrica, el diseño de tierra y la presencia de fenómenos de interferencia electromagnética (CEM), que afectan tanto al funcionamiento de los equipos como a la fiabilidad de las comunicaciones industriales.

Problemáticas detectadas

Hallazgos del análisis:

- Fallos en la comunicación PROFIBUS DP: provocados por longitudes de cable inadecuadas, ausencia de resistencias de terminación correctas, y una topología de red no conforme a las recomendaciones de los fabricantes y normativas.
- Presencia de interferencias electromagnéticas (CEM): atribuibles a un diseño deficiente de la red de tierras, la incorrecta disposición de mallas de apantallamiento y la emisión de armónicos por parte de variadores de frecuencia (VDF).
- Uso inadecuado de conductores de protección (PE): especialmente en lo relativo a su longitud, sección y disposición, lo que genera la posibilidad de lazos de tierra y corrientes parásitas.
- Ausencia de elementos de filtrado en VDF y en motores: lo que permite la propagación de ruido eléctrico hacia otras partes de la instalación.
- Falta de instrumentación para la detección de transitorios eléctricos: impidiendo la identificación de perturbaciones de alta frecuencia que puedan afectar a los sistemas de control.

Propuestas de solución

Para mitigar los problemas descritos, se han planteado una serie de medidas correctoras y preventivas basadas en normativas como la IEC 61000-5-2 y en recomendaciones de fabricantes líderes en automatización industrial. Estas medidas incluyen:

- Reorganización de la red de comunicación industrial, garantizando que todos los tramos tengan una longitud mínima adecuada, con terminaciones correctas y sin derivaciones en "T".
- Instalación de ferritas y filtros CEM en las salidas de variadores de frecuencia para minimizar la emisión de ruido conducido y radiado.
- Conexión apropiada de las mallas de apantallamiento en ambos extremos de los cables, asegurando su puesta a tierra con baja impedancia para corrientes de alta frecuencia.
- Sustitución de cables de protección por mallas planas o conductores trenzados, reduciendo la inductancia y mejorando el drenaje de corrientes parásitas.
- Implementación de brazos de conexión a tierra para estructuras metálicas y carcasas de maquinaria, mejorando la equipotencialidad y minimizando el riesgo de descargas o chispas.
- Incorporación de sistemas de monitorización continua de transitorios eléctricos, lo cual facilitará el mantenimiento predictivo y permitirá detectar eventos anómalos que de otro modo pasarían desapercibidos.

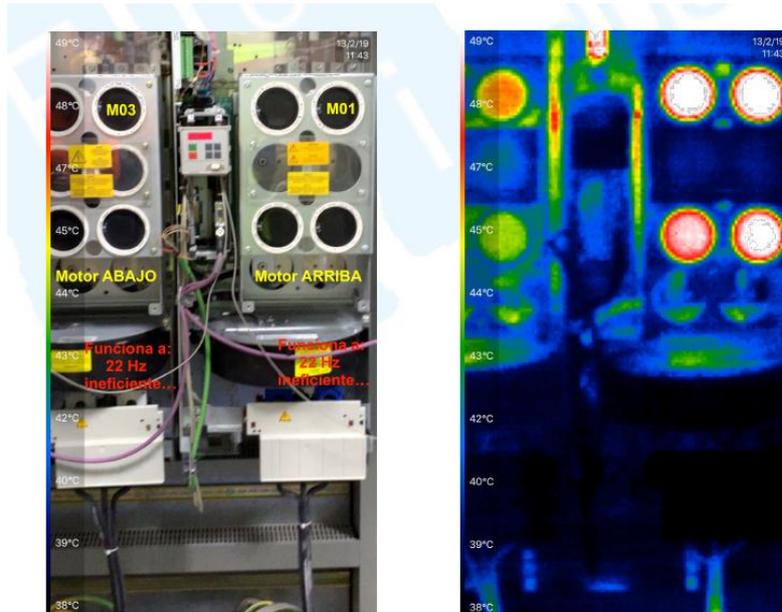


Figura 11. VDF Siemens alimentado por continua desde un inversor. [11]

“No obstante, los variadores de frecuencia (VDF) y servomotores suministran potencia a los motores mediante la simulación de una señal sinusoidal. Una modulación de anchura de pulsos (PWM) que no es una forma de onda sinusoidal pura. [7]”

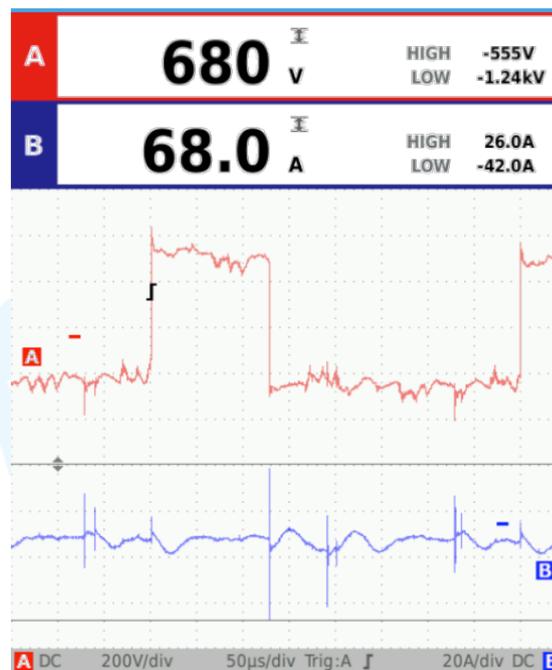


Figura 12. Forma de onda a la salida en tensión y corriente, PWM [12]

“Se pueden apreciar los picos de corriente (azul), transitorios que llegan a los motores, y que circulan por la instalación. En la forma de onda de tensión (rojo). También se observan reflexiones, dato que revela que la línea no está bien adaptada, motor-cable-VDF. A causa de esta forma de trabajo (control de modulación electrónica), que es un

control rápido de las conmutaciones por fase de transistores (IGBT) y, necesario para generar la inducción en los bobinados del motor, ese voltaje sumatorio en un punto neutro nunca es CERO, sino que oscila entre negativo y positivo. Siendo el voltaje una forma de onda cuadrada de seis escalonados voltajes. La potencia entonces en el motor nunca esta balanceada. [7]"

"Proponemos la instalación en varios brazos magnéticos conectados a tierra en puntos de la cinta para la descarga de las corrientes circulantes y/o estáticas detectadas y que estaban presentes. [7]"

Soporte magnético universal

Fuerza de imantación: 600 N (en ejecución universal ref. 7011 SN)
 Altura total 235 mm. Base magnética 60x50x55 mm. Agujero para fijación de comparadores de Ø 8 mm.
 Campo de aplicación: Fijación universal de comparadores para mediciones horizontales y verticales.

		Ref. Mitutoyo	Fuerza imantación N	Radio de trabajo mm
D4 4180	Sin aprox. micrométrica	7010SN	600	150
D4 4190	Con aprox. micrométrica	7011SN	600	160
D4 4200	Con columna articulada	-	750	—
D4 4210	Brzo de 300 mm	02AZC282*	—	—



Línea de transporte de tableros

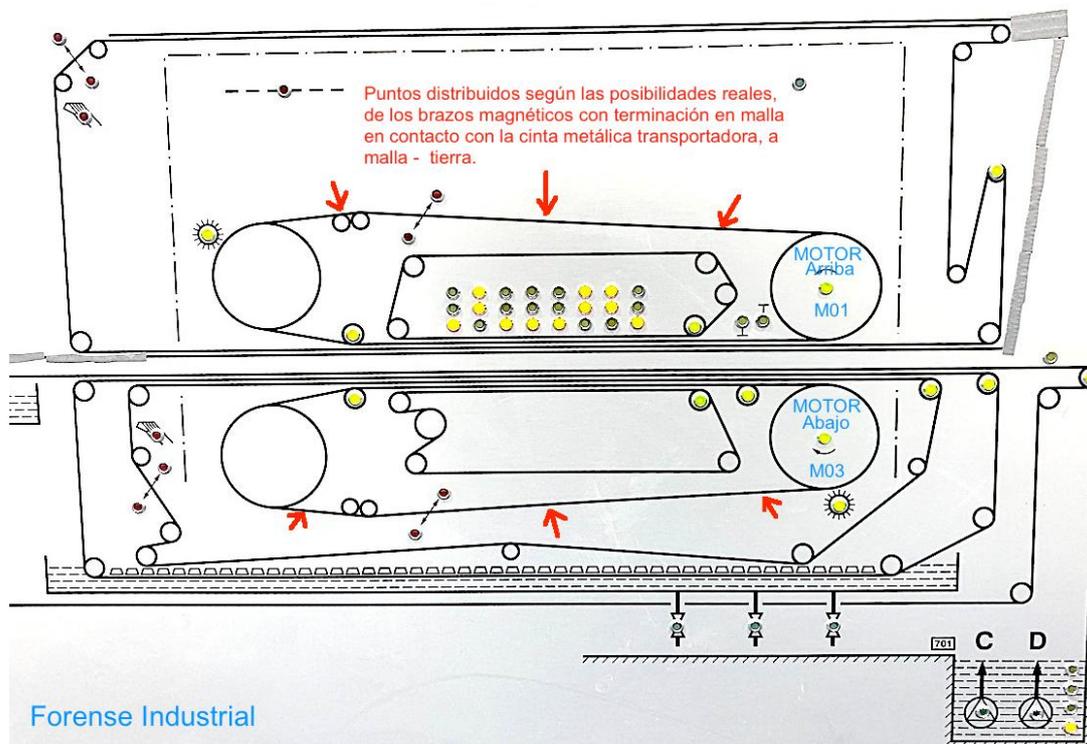


Figura 13. Soporte magnético del fabricante Unceta y puntos de instalación. [13]

"Se deben cambiar los tramos de cable de profibus DP que sea inferior al metro de longitud por otro de un metro e instalar ferritas a la salida de los VDF hacia el motor. [7]"



Figura 14. Estado de los cables Profibus DP y conexiones a la salida del variador. [14]

“En profibus DP existe mucho ruido y reflexiones, el ruido es debido a la falta de adaptación de los cables de VDF-Motor. Las reflexiones son debidas a la escasa longitud entre algunos tramos del cableado de comunicaciones. [7]”



Figura 15. Medida de la calidad de comunicación del bus Profibus DP. [15]



Figura 16. Medida de intensidad del campo eléctrico 1708 mW/cm². [16]

“PROFIBUS DP indica que la longitud mínima entre equipos debe ser de un metro. Sin embargo, si se usan los conectores Murr Elektronik con conectores métricos M, los latiguillos pueden ser de longitudes menores al metro. [7]”

Esta indicación para una correcta comunicación tiene que ver con la integridad de la señal eléctrica y el fenómeno de reflexión de señal en líneas de transmisión. PROFIBUS DP es una red basada en comunicación serial RS-485, que utiliza un cableado específico con una impedancia característica (normalmente 150 ohmios). Cuando el cableado entre dispositivos es demasiado corto (menos de 1 metro), puede producirse una reflexión de señal en los extremos del cable si la impedancia no está bien adaptada. Estas reflexiones pueden causar interferencias y errores de comunicación. Por eso, el estándar recomienda una distancia mínima de 1 metro entre dispositivos PROFIBUS.

MurrElektronik y otros fabricantes ofrecen cables preensamblados y conectores especiales (como los métricos M12 o M23) que están diseñados con:

- Impedancia controlada de extremo a extremo.
- Blindaje adecuado y calidad de señal garantizada.
- Conectores que minimizan las reflexiones, incluso con distancias más cortas.

Esto significa que, aunque el cable sea más corto de 1 metro, no compromete la calidad de la comunicación, porque el conjunto del latiguillo (conector + cable) está diseñado para respetar las condiciones eléctricas del bus PROFIBUS.

“Eliminar los cables PE de las puertas por malla, evitar bucles y recorridos largos por las canalizaciones. [7]”

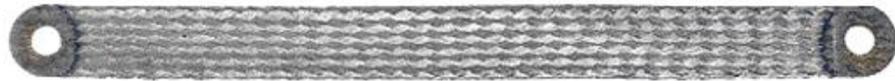


Figura 17. Malla de conexión a tierra 35 mm². 200 mm orificio (M6). I_{max} 195 A [17]

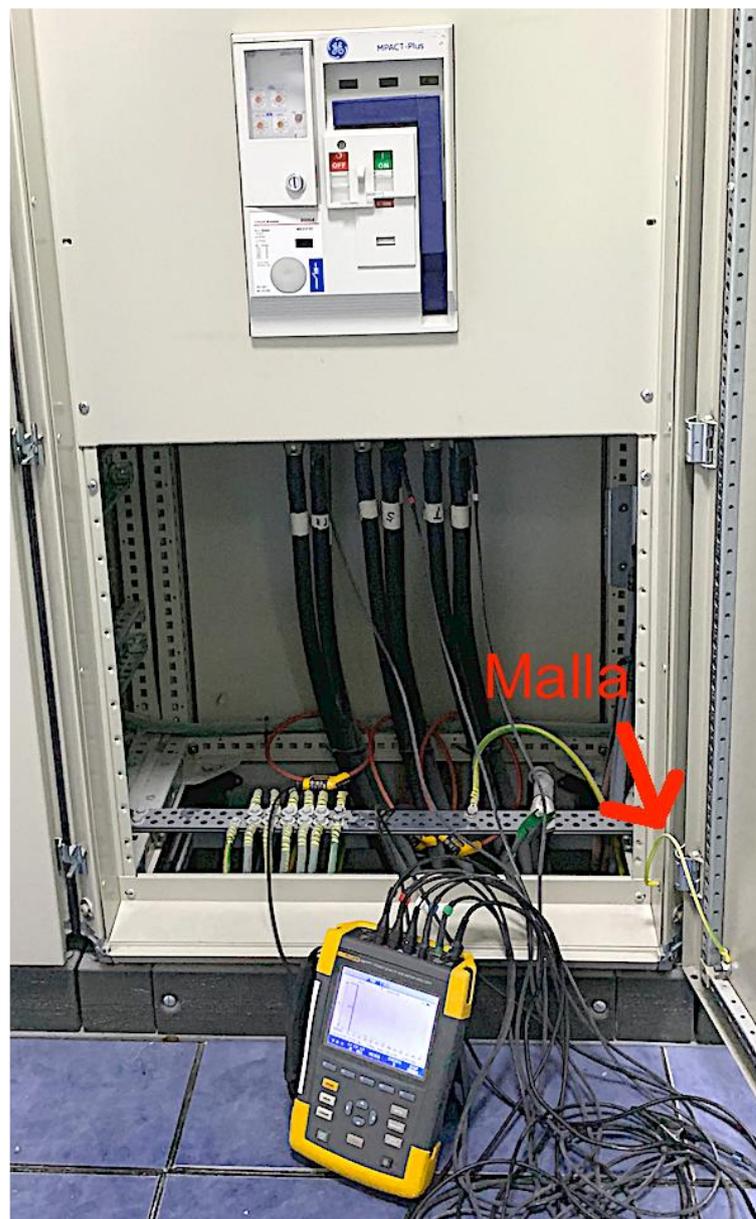


Figura 18. Cable de tierra a sustituir por la malla arriba indicada. [18]

“En los motores, y zonas metálicas de la máquina, utilizar malla trenzada en lugar de cable PE.”

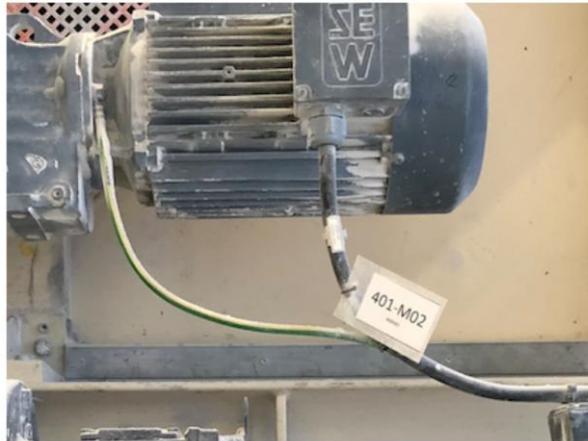
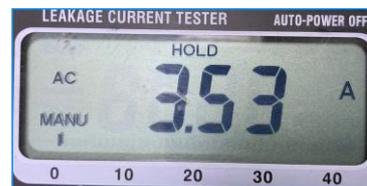


Figura 19. Cable de tierra a sustituir por malla como la arriba indicada. [19]

“El motor eléctrico se comporta como un condensador, esas elevadas frecuencias PWM de conmutación producen voltajes capacitivos entre el estator y rotor, que acaban fugando a tierra a través de los rodamientos metálicos y el aceite del engrase (se descargan). Corriente de fuga superior a los 3 Amperios.”



“Provocan corrientes en modo común que circulan por tierra (que se comporta como un buen conductor), llegando a cualquier zona de la instalación. Estas corrientes de frecuencias elevadas circulan también por el eje del motor hacia el acoplamiento y la carga, por lo que el sistema de protección a tierra debe estar equipotencial y correctamente instalado.”



Figura 20. Medida de la corriente que circula por la máquina herramienta, una correcta protección a tierra minimiza esta corriente. [20]

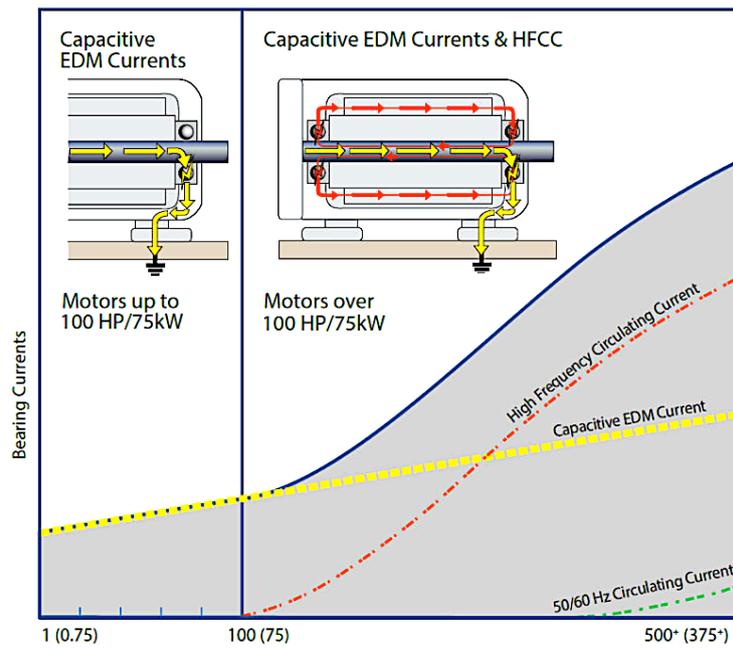


Figura 21. Sistema AEGIS. [21]

Ya hemos indicado que cuando se usan variadores de frecuencia (VFD) para controlar motores, se generan tensiones de modo común debido a la conmutación rápida del VFD. Estas tensiones inducen corrientes eléctricas de alta frecuencia en el eje del motor. Estas corrientes circulan por el eje y, al no tener una ruta directa a tierra, buscan cerrar el circuito a través de los rodamientos del motor, lo cual genera:

- Pequeños arcos eléctricos entre las bolas y la pista del rodamiento.
- Daño mecánico progresivo: picaduras (pitting), estrías (fluting), ruido y eventual fallo.
- Reduce la vida útil de los rodamientos, lo cual significa paradas no programadas y mayor mantenimiento.

AEGIS actúa como un camino alternativo de baja impedancia a tierra:

- Desvía las corrientes del eje directamente al chasis del motor, y de ahí a tierra.
- Evita que esas corrientes atraviesen los rodamientos, eliminando los arcos eléctricos.
- Se instala alrededor del eje del motor, tocando el eje mediante fibras conductoras (como filamentos de carbono).



Figura 22. Tensión en el rodillo que genera arcos eléctricos y deterioro del cojinete. [22]

En este punto se vuelve a recomendar la instalación de brazos magnéticos para una correcta derivación a tierra de las corrientes espurias.

El informe de Forense Industrial es más amplio y menciona otros problemas más relacionados con las longitudes de cable de fuerza desde los variadores de velocidad a los motores, las líneas de tierra, como se encuentra la referencia a tierra de toda la instalación de la máquina herramienta, etc. En el TFG mostramos los problemas o casos más relacionados con la medida y comunicación y como hemos podido observar en el informe, Forense Industrial además de detectar donde se producen los fallos y por qué propone como solucionarlos recomendando invertir en equipos de análisis y medida eléctrica en diferentes puntos de la instalación para asegurar un suministro de energía de calidad, también en tener en cuenta las recomendaciones que imponen los estándares de comunicación de los equipos de control y accionamientos en lo referente a longitudes de latiguillos de comunicación o bien considerar soluciones de fabricantes que garanticen una impedancia adaptada que permita la máxima transferencia de potencia en la comunicación de los equipos.

3.2 Medidas en accionamientos

Como ya habíamos indicado, la intención de dirección el cliente es continuar con su proceso de mejora de la instalación, con un claro objetivo de digitalización del proceso. No dejar la instalación en una mera automatización y control de la instalación, pretenden invertir en control y comunicaciones con la intención de mejorar en muchos aspectos, como los mantenimientos prescriptivos, mejorar la gestión de la producción y optimizar el uso de energía desde el suministro hasta el consumo.

Se plantea la instalación de una red inalámbrica privada para disponer de datos de activos móviles y otros que se encuentran en zonas de difícil acceso con red cableada, se cuenta con zonas de procesamiento de la materia prima que por sus características no requieren de mucho control y los equipos de accionamiento funcionan con sistemas marcha paro los cuales no necesitan de comunicaciones, no obstante, los motores de estos equipos son fundamentales en el proceso y suelen ser equipos de elevada potencia por lo que invertir en un pequeño sistema de medida de temperatura y vibración tiene sentido. En un principio se plantea un sistema de comunicación 4G privada, la gobernanza de la empresa en ese momento es alemana y cuentan con redes 4G privadas en algunas de sus instalaciones, esta opción rápidamente se descarta, en primer lugar por el tamaño de la red, en este caso no va a ser una red extensa que justifique la inversión y aunque puede aportar un buen servicio, este no va a diferenciarse mucho de una comunicación Wifi 2,4 - 5Ghz, además de esto hay que añadir que en España no está liberado el espectro radioeléctrico en el que opera 4G, deberían de contar con operadores privados con la posibilidad de que la comunicación pase por sus servidores y no garantice la velocidad y latencia necesaria en algún proceso de control. Finalmente se opta por instalar una red Wifi 2,4 – 5Ghz que permita integrar aquellos equipos de difícil acceso y los carros y dispositivos móviles de planta.

A continuación, mostramos una comparativa entre las dos tecnologías que acredita la decisión en base a que la red que se necesita no es extensa y que el espectro radioeléctrico no está liberado en esta frecuencia, mientras que, en Alemania, donde ya cuentan con redes 4G privadas en rangos de frecuencia 3,7 y 3,8 Ghz. A diferencia de

España, la **Agencia Federal de Redes de Alemania (Bundesnetzagentur)** gestiona y asigna este espectro a empresas que solicitan licencias para establecer sus propias redes locales, así de esta forma la empresa controla totalmente la red desde la torre, el core de red, hasta el tráfico interno.

Aspecto	Alemania – 4G Privado	España – 4G vía Operadora	Wi-Fi 2,4-5Ghz Industrial Siemens (SCALANCE + PROFINET)
Disponibilidad espectro 4G	Libre (3,7–3,8 GHz) para empresas	Solo operadoras (no libre para industrias)	Libre uso, sin depender de espectro nacional
Control de la red	Total (red privada real)	Parcial (operadora gestiona red/core)	Total (tú gestionas el tráfico, core y acceso)
Latencia esperada	Muy baja (~10 ms o menos, dedicada)	Variable (~30-50 ms, depende del SLA)	Baja (~5-15 ms bien configurada en entorno limpio)
Infraestructura necesaria	Media/Alta (torre, licencia, eNodeB)	Baja (se contrata, pero con coste mensual)	Media (punto de acceso SCALANCE + antenas)
Coste operative	Medio (pago licencia inicial, mantenimiento)	Recurrente (cuotas al operador, coste por tráfico)	Bajo (solo mantenimiento interno)
Movilidad	Alta (ideal para AGVs, robots móviles)	Alta, pero depende de cobertura operadora	Alta en planta (limitada por cobertura Wi-Fi)
Fiabilidad	Alta si bien diseñado	Variable (sujeto a red compartida)	Alta en espacios industriales bien montados
Simplicidad de despliegue	Requiere ingeniería RF y permisos	Sencillo (contrato con operadora)	Sencillo (mismo ecosistema Siemens)

Tabla 4. Comparativa técnica – Latencia y Viabilidad en Redes Industriales

En este apartado se expondrá la situación actual de la máquina herramienta sobre la que se van a realizar una serie de adecuaciones y mejoras. Estas adecuaciones están relacionadas principalmente con la aplicación de un retrofit en los controladores y servoaccionamientos de la máquina. Los equipos actualmente en uso han sido descatalogados, lo que hace recomendable migrar a equipos actuales que cuenten con el respaldo del fabricante, garantizando así varias décadas de suministro continuo, tanto en venta habitual como en repuestos.

En cuanto a este retrofit, hemos llegado a proponer no solo el suministro de los equipos, sino también la migración completa, ya que Selcansa, al ser una empresa perteneciente al grupo Elektra, dispone de personal acreditado como Siemens Solution Partner y Siemens Approved Partner. Esta certificación facilita enormemente la colaboración directa con Siemens, el fabricante de los equipos instalados, lo cual resulta crucial a la hora de definir y valorar las mejores soluciones técnicas para la máquina herramienta en cuestión.

Por otro lado, en el caso de que se decida llevar a cabo una migración de equipos, Elektra cuenta con la experiencia de Ingenova, una empresa integradora con una sólida solvencia técnica que garantiza la capacidad de acometer este tipo de proyectos con éxito. Ingenova dispone de los recursos y el conocimiento necesarios para llevar a cabo la actualización de los sistemas de control y servo-accionamiento, asegurando la integridad y la mejora de las capacidades de la máquina.

Sin embargo, finalmente perdimos la oportunidad debido al compromiso y relación estrecha que el grupo tiene con el fabricante original de la máquina. El fabricante, quien en breve iba a suministrar una máquina de características similares, pero ya actualizada, tiene una relación comercial preferencial con la empresa, lo que influyó en la decisión final. Aunque nuestra propuesta aportaba un enfoque de mejora tecnológica y garantía de continuidad en el suministro de repuestos y soporte, la decisión final estuvo marcada por la alianza estratégica que el grupo mantiene con el fabricante original, lo que dificultó nuestra posición en la competencia.

A pesar de haber perdido esta oportunidad la empresa cuenta con nosotros y un integrador local para el suministro de redes wifi y sistemas de medida de vibración en motores, que es la parte que va a tratar este apartado, definirán una serie de puntos de control que se integran con PLC's existentes y otros a mayores.

Nos centrándonos en la instrumentación usada para medir vibraciones tanto en la industria como en infraestructuras. La medida de vibraciones se contempla cada vez más como una necesidad a la hora de plantear mantenimientos predictivos en ambos sectores. La forma de acometer esta medida generalmente se hace de dos maneras, de forma directa con sensores piezoeléctricos que permiten medir rangos de frecuencia de hasta 15kHz generalmente en motores eléctricos y con sensores ópticos que miden rangos de frecuencias muy bajas usados generalmente en infraestructuras, de forma indirecta con sensores ópticos basados en el principio de interferometría óptica, usados generalmente en entornos muy agresivos como turbinas de hidrógeno, generalmente en ambientes donde la probabilidad de que existan fenómenos CEM es muy alta. Este tipo de tecnología óptica aún no se aplica a usos más habituales como la medida de vibración en los motores eléctricos de las plantas industriales porque suelen ser sistemas caros y que requieren de una instalación más exigente o controlada, no obstante, estos métodos a su vez aportan mucho valor, no solo por su precisión también por generar menos consumo, dato fundamental a futuro lo cual afianza una vez más como la óptica juega un papel importante en muchos niveles de la pirámide de automatización, cada vez más.

Medida de vibraciones en motores eléctricos por contacto directo con sensor IEPE

Empecemos con los sensores de medida de vibración que basan su funcionamiento en el principio piezoeléctrico. Hay que tener en cuenta que la solución no es muy exigente por lo que nos basamos en este tipo de sensores, los cuales no tienen un precio elevado en comparación con los equipos que miden y la importancia que tienen estos activos en el proceso. Estos dispositivos utilizan un transductor piezoeléctrico e integran una electrónica que detecta y evalúa las vibraciones. Cuando se produce una vibración, el material piezoeléctrico genera una carga eléctrica proporcional a la aceleración de la vibración. Esta señal es procesada por la electrónica interna del sensor para proporcionar una tensión de salida analógica utilizable en sistemas de monitoreo y análisis de

vibraciones. Los sensores no registran las fuerzas de aceleración estáticas, como, p. ej., la aceleración de la gravedad. Uno de los estándares industriales para sensores piezoeléctricos es IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric).

A continuación, explico el modo de funcionamiento tomando como ejemplo el sensor **Siemens 6AT8002-4AB00**, definido por el fabricante como **SIPLUS CMS2000 VIB-Sensor S01**. [23]



Figura 23. SIPLUS CMS2000 VIB-Sensor de medida de vibración S01. [23]

Tomando como ejemplo este sensor, vemos que tiene una sensibilidad de 100 mV/g ($\pm 10\%$) y puede medir en un rango de frecuencias desde 0,5 Hz hasta 15 kHz, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones industriales. Además, está diseñado para operar en condiciones ambientales exigentes, con un rango de temperatura de funcionamiento que va desde -50°C hasta $+120^{\circ}\text{C}$.

El funcionamiento piezoeléctrico se basa fundamentalmente en esta relación:

$$Q = d \cdot F$$

Donde: Q carga eléctrica en culombios, d coeficiente piezoeléctrico en pC/N, F fuerza en Newtons

Sabemos que:

$$F = m \cdot a$$

Donde: F fuerza en Newtons, m masa en kilogramos, a aceleración en m/s^2

Que al sustituir nos queda:

$$Q = d \cdot m \cdot a$$

El material piezoeléctrico suele estar conectado a una capacidad de realimentación, la capacidad interna del sensor. La variación de esta capacidad provoca cambios de voltaje a partir de los que se interpretan las medidas. La capacitancia es la capacidad de un sistema para almacenar carga eléctrica cuando se aplica una diferencia de potencial.

$$C = \frac{q}{V}$$

Donde: C capacidad en Faradios, Q carga eléctrica en culombios, V tensión en voltios
Suponemos un condensador de placas paralelas en donde la capacidad se define:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

Donde: **C** capacidad en Faradios, **ε** permitividad dieléctrica, **A** área de placas m², **d** distancia en m

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Donde: **ε** permitividad dieléctrica, **ε₀** permitividad del vacío, 8.854×10⁻¹² F/m, **ε_r** permitividad relativa del material

La capacidad aumenta si se aumenta el área de las placas, se disminuye la separación entre las placas, se usa un material dieléctrico con mayor permitividad relativa. El condensador almacena energía en forma de campo eléctrico, cuya energía total se expresa como:

$$U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V$$

Donde: **U** energía en julios, **C** capacidad en Faradios, **V** tensión en voltios

El condensador muestra un comportamiento en función de la frecuencia, a medida que aumenta la frecuencia la impedancia del condensador disminuye, este comportamiento se define:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Donde: **X_c** impedancia en ohmios, **ω** frecuencia angular en radianes, **C** capacidad en faradios, **f** frecuencia en hercios

Finalmente llegamos a una relación entre la carga y la capacidad del sensor que se puede definir:

$$V_{out} = \frac{Q}{C_f} = \frac{d \cdot m \cdot a}{C_f}$$

Donde: **V_{out}** tensión en voltios, **Q** carga eléctrica en culombios, **C_f** capacidad final en Faradios, **d** coeficiente piezoeléctrico en pC/N, **m** masa en kilogramos, **a** aceleración en m/s².

Esto nos muestra que el voltaje de salida es directamente proporcional a la aceleración aplicada, siempre que d y C_f sean constantes.

Relación entre las magnitudes, las frecuencias y la energía

El gráfico siguiente muestra la evolución de las amplitudes de las tres magnitudes de vibración, es decir, la elongación vibratoria, la velocidad de vibración y la aceleración de la vibración, a medida que aumentan las frecuencias. El gráfico permite deducir hasta qué frecuencias resulta oportuno medir y evaluar una determinada magnitud de vibración. [24]

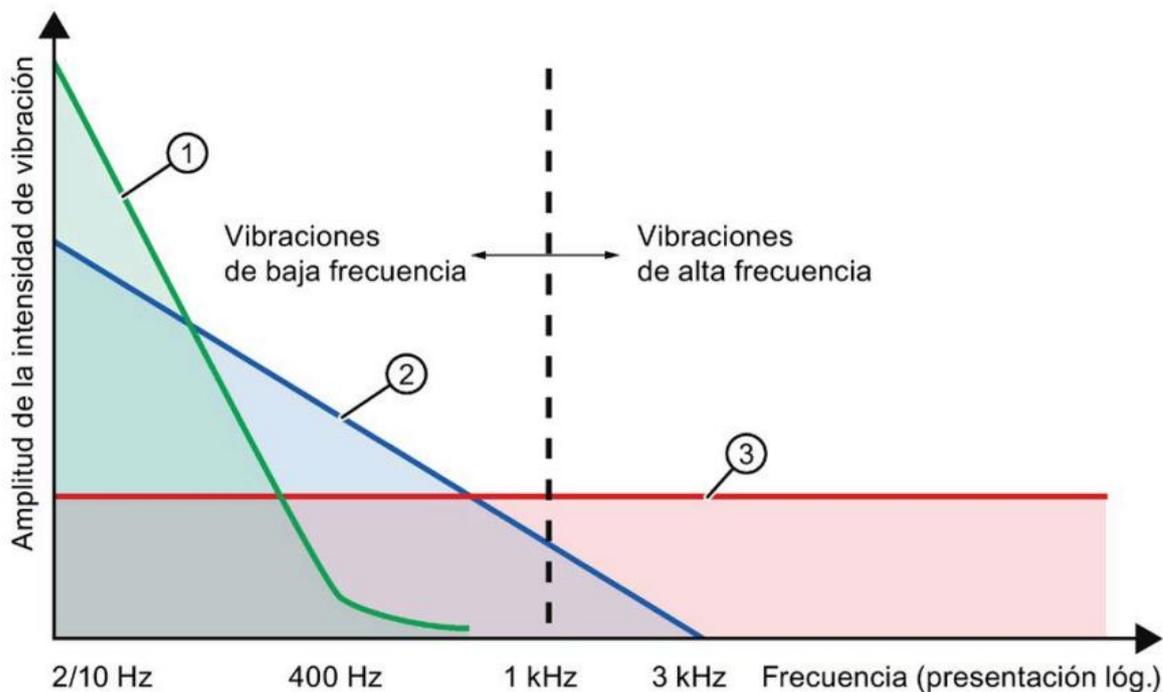


Figura 24. Evolución de las amplitudes de las tres magnitudes de vibración. [24]

Núm.	Magnitud de vibración	Causas de la vibración y límites de medida
1	Elongación vibratoria (μm)	Vibraciones del eje de 1 Hz a 0,4 kHz
2	Velocidad de vibración (mm/s)	Vibraciones de la carcasa de 2 Hz/10 Hz a 1 kHz
3	Aceleración de la vibración (m/s^2)	Ruido del reductor y estructural de 2 Hz/10 Hz a 20 kHz

Tabla 5. Magnitud y causa de la vibración.

Procedimiento para la detección de errores y el diagnóstico

Procedimiento para la vigilancia de estado

En la monitorización de máquinas existen varios métodos y procedimientos para la vigilancia de estado y el diagnóstico. A continuación, se indican los procedimientos implementados con la tarjeta SM 1281.

Cálculo de valores característicos mediante la medida de vibración en el tiempo

Para la vigilancia del estado de máquinas se registran una serie de valores característicos adecuados que permiten estimar el estado general de vibración de la máquina. La evolución tendencial de estas magnitudes revela los posibles problemas del estado del equipo, es decir, los daños que están en camino de producirse.

- **vRMS**: Intervalo del valor eficaz de la velocidad de la vibración para determinar el estado general de la vibración.
- **aRMS**: Intervalo del valor eficaz de la aceleración de la vibración para determinar el estado de los rodamientos.
- Cálculo del valor característico DKW a través de la aceleración de la vibración (DKW) para determinar el estado de los rodamientos

Diagnóstico de vibraciones mediante análisis de frecuencias

Para una localización precisa de fallos no basta con la medición de valores característicos. Es necesario analizar con más detalle el cuadro de vibraciones de la máquina. La mayoría de los tipos de defectos se detectan en el espectro de frecuencias (en lo sucesivo, denominado espectro) al producirse frecuencias de fallo o patrones típicos de frecuencias de fallo. En la tarjeta SM 1281 pueden calcularse los siguientes espectros, que se utilizan para el diagnóstico y la monitorización de vibraciones.

- **Espectro de la velocidad de vibración.** Útil para detectar desalineaciones, desequilibrios dinámicos y problemas de acoplamiento. Las vibraciones en bajas frecuencias suelen estar asociadas a fenómenos mecánicos globales.
- **Espectro de la aceleración de la vibración.** Más sensible a componentes de alta frecuencia, como el desgaste de rodamientos, picaduras en pistas o problemas de lubricación. El análisis en aceleración permite evaluar la condición de elementos internos más rápidamente.
- **Espectro de la envolvente.** Se utiliza especialmente en el análisis de rodamientos. Este tratamiento permite extraer las frecuencias portadoras relacionadas con impactos repetitivos, revelando fallos incipientes en elementos rodantes, pistas o jaulas, incluso en presencia de ruido mecánico.

Los análisis simultáneos de estos tres espectros proporcionan una visión integral del estado mecánico del equipo, permitiendo llevar a cabo mantenimientos predictivos en lugar de correctivos, anticipando así paradas y reduciendo costes de operación. La tarjeta de vigilancia SM 1281 permite definir umbrales personalizados en cada uno de los valores característicos y espectros. Estos umbrales se pueden configurar en base a:

- Valores de referencia del fabricante de los componentes.
- Niveles base medidos durante el funcionamiento nominal.
- Algoritmos de autoaprendizaje o inteligencia artificial (con procesamiento en edge o en la nube).

Cuando uno de estos valores supera los límites definidos, el sistema puede:

- Activar una señal de advertencia o alarma digital en el PLC.
- Generar notificaciones al sistema SCADA o al responsable de mantenimiento.
- Registrar automáticamente el evento y su histórico para análisis posterior.

La integración del sistema de monitorización con la arquitectura de control SIMATIC permite correlacionar los datos de vibración con:

- Cambios de velocidad de los variadores.
- Cargas del proceso.
- Temperaturas, presiones u otras variables relevantes.

De esta forma, se pueden establecer correlaciones cruzadas que faciliten el diagnóstico multivariable, dando lugar a modelos predictivos más precisos. Además, si se desea almacenar, visualizar o analizar los datos en sistemas superiores, estos pueden transmitirse vía OPC UA, MQTT o a plataformas de analítica como MindSphere o soluciones edge.

La integración de los sensores de vibración requiere una arquitectura de control fiable y escalable. La familia **SIMATIC S7-1200/S7-1500** de Siemens ofrece una base sólida, especialmente al incorporar módulos como:

- **SM 1281 Condition Monitoring Module:** ideal para diagnóstico de vibraciones y cálculo de valores característicos en tiempo real.
- **CP 1542-5 o CP 1243-7:** para conectividad Profinet o MQTT, facilitando la conexión de sensores inalámbricos o sistemas edge.
- **SCALANCE W:** puntos de acceso industriales para la red Wi-Fi integrada, ya evaluada como alternativa óptima en este caso.

Esta configuración permite un sistema distribuido, robusto y abierto a futuras ampliaciones, integrando tanto sensores convencionales IEPE como nuevas tecnologías.

La integración de estos equipos se lleva a cabo junto con la puesta en marcha de carros móviles encargados de transportar materiales entre distintas máquinas herramienta y zonas de almacenaje. Estos materiales son trazados con el objetivo de tener un control preciso sobre la producción y permitir el cruce de datos entre la planta, la contabilidad y la gestión de pedidos.

En la instalación existen varios autómatas S7-1200 y puntos de acceso Wi-Fi, tanto en planta como en los propios carros, que también incorporan controladores. Toda la información generada se transmite mediante Wi-Fi y Profinet, y se centraliza en un equipo S7-1500.

Alternativas para la Medición de Vibraciones: Sensores basados en Redes de Bragg en Fibra Óptica

En aplicaciones donde se requiere una monitorización precisa de vibraciones, la solución convencional suele pasar por sensores piezoeléctricos o sistemas como los sensores KIEPE. Sin embargo, tecnologías emergentes como los sensores FBG ofrecen ventajas notables en entornos complejos, donde se valoran la seguridad, la inmunidad electromagnética o la capacidad de multiplexación.

¿Qué es una red de Bragg en fibra?

Una red de Bragg es una estructura refractiva inscrita dentro del núcleo de una fibra óptica que refleja selectivamente una longitud de onda concreta según las condiciones del entorno (temperatura, deformación, vibración). Esto convierte la fibra en un sensor distribuido, ideal para monitorización en tiempo real.

Tipo de sensor FBG	Magnitud medida	Aplicaciones comunes
FBG de deformación lineal	Deformación, vibración estructural	Puentes, túneles, maquinaria, fachadas
FBG de temperatura	Temperatura puntual o distribuida	Cuadros eléctricos, salas técnicas, HVAC
FBG de aceleración	Vibraciones dinámicas	Equipos rotativos, entornos sísmicos
FBG de inclinación	Cambios estructurales o desplazamientos	Taludes, cimentaciones, estructuras
FBG multiaxial	Medición combinada	Transporte inteligente, infraestructuras críticas

Tabla 6. Tipos de sensores y aplicaciones típicas.

Ventajas frente a sensores convencionales

- Inmunidad electromagnética total.
- Multiplexación: decenas de sensores en una sola fibra.
- Pasividad: sin alimentación eléctrica en campo.
- Alta precisión y resolución.
- Resistencia a entornos extremos.
- Integración arquitectónica invisible.

Aplicaciones concretas

- **Edificios inteligentes:** detección de deformaciones estructurales, movimientos sísmicos o cargas dinámicas.
- **Centros sanitarios:** sensores pasivos en camas o suelos para detección de presencia o caídas.
- **Infraestructura crítica:** túneles, puentes, estaciones de metro o aeropuertos.
- **Instalaciones hoteleras o residenciales de alta gama:** control estructural o ambiental sin interferencias.

Conclusión sobre FBG

Los sensores FBG representan una evolución tecnológica significativa respecto a soluciones tradicionales. Aunque implican una mayor inversión inicial, su fiabilidad, escalabilidad e integración los convierten en una apuesta tecnológica clara para el futuro.

Volviendo a los entornos más exigentes, si trasladamos este tipo de instalaciones a un buque o aeronave, la tecnología utilizada sigue siendo sofisticada, pero predomina el uso de soluciones probadas, fáciles de mantener y reparar. En estos casos, la fiabilidad y durabilidad son prioridades absolutas, lo que limita la incorporación de innovaciones demasiado recientes.

En nuestros ejemplos se observa cómo se gestionan distintas tecnologías, y es evidente que, con el tiempo, la integración de soluciones avanzadas permitirá una mayor recopilación de datos. Esta acumulación, combinada con sistemas de procesamiento de señales, dotará a los equipos directivos de herramientas más sólidas para la toma de decisiones basada en modelos predictivos y datos fiables.

3.3 Arquitectura de red industrial segura según NIS2.

El diseño de red se plantea teniendo en cuenta los requisitos de la normativa **NIS2 (Network and Information Security 2)**, de obligado cumplimiento en Europa para sectores esenciales como energía, transporte, salud e infraestructuras críticas. Esta directiva establece los siguientes principios:

- Gestión proactiva de riesgos de ciberseguridad.
- Control de accesos y protección de activos conectados.
- Segregación de redes críticas.
- Registro de eventos y trazabilidad operativa.
- Actualización y mantenimiento continuo de los sistemas.
- Cifrado de las comunicaciones cuando proceda.
- Gestión eficaz de vulnerabilidades e incidentes.

Requisito NIS2	Cumplimiento en la propuesta
Segmentación de red	Zonas OT separadas, firewall SCALANCE S615
Acceso remoto seguro	VPN IPsec, control por MFA y certificados
Movilidad con seguridad	Wi-Fi SCALANCE WPA2 Enterprise + roaming optimizado
Supervisión de red	SNMPv3 + Syslog + SIEM
Control de acceso a PLC	Roles, firewalls embebidos, bloqueo por IP
Cifrado de datos	VPNs + TLS según criticidad
Registro y trazabilidad	Eventos, accesos, alarmas de red

Tabla 7. Requisitos y como los cumplimos

Zonificación y segmentación de red (ISA/IEC 62443).

En este caso se recomienda dividir la red en al menos tres zonas OT independientes:

Zona de control fija.

- Equipos S7-1500 y S7-1200 que gestionan procesos fijos (automatismos, climatización, líneas de producción).
- Comunicaciones a través de SCALANCE XC o XR gestionables con VLAN.

Vagones o carros móviles con CPU S7-1200 y comunicación Wi-Fi.

- Comunicación a través de SCALANCE W780/W740 (antenas Wi-Fi industriales).

Zona de supervisión y acceso remoto (DMZ industrial):

- Paneles HMI, SCADA, gateways IoT o servidores.
- Acceso desde IT corporativa o mantenimiento remoto.

Cada zona está conectada entre sí a través de un SCALANCE S615, que actúa como firewall industrial y punto de inspección del tráfico entre zonas, permitiendo solo protocolos y equipos autorizados.

Comunicaciones Wi-Fi seguras para carros móviles.

Los equipos móviles como vagones con S7-1200 se conectan mediante:

- Puntos de acceso SCALANCE W780-1 o W774-1 en techo o paredes, alimentados por PoE.
- Clientes Wi-Fi SCALANCE WUM en los carros o integrados directamente en el armario del vagón.
- Protocolo Profinet sobre Wi-Fi optimizado para movilidad (fast roaming, tiempos de handover <50 ms).
- Autenticación WPA2 Enterprise o por certificados digitales X.509, no por clave compartida (PSK).
- Posibilidad de establecer una VPN IPsec desde los vagones hacia la zona de control si el tráfico es sensible o pasa por red compartida.

Esto cumple NIS2 al garantizar confidencialidad, autenticación fuerte y trazabilidad del dispositivo móvil.

Control de accesos y protección de PLC

En S7-1200/1500:

- Activar protección de proyecto con contraseña.
- Habilitar el firewall embebido en S7-1500 (bloqueo por direcciones IP).
- Definir roles de usuario con distintos niveles de privilegio (lectura, escritura, diagnóstico).

Desde la red:

- Uso de servidor Radius/LDAP si se gestiona a nivel corporativo.
- Control de MAC y VLAN dinámica en SCALANCE.

Trazabilidad, supervisión y registro de eventos

- Habilitar SNMP v3 y Syslog en todos los SCALANCE (S, XC, W).
- Integrar registros en un servidor SIEM industrial para auditoría y detección de intrusiones.
- Registrar:
 - Cambios de configuración.
 - Conexiones remotas y roaming de dispositivos móviles.
 - Alarmas de tráfico no permitido o anomalías.

Gestión de incidencias

- Establecer un plan de respuesta a incidentes OT.
- Backup de configuraciones de PLC y switches.
- Pruebas de restauración y control de integridad (checksum).
- Segmentar también las actualizaciones y accesos a TIA Portal a través de la DMZ.

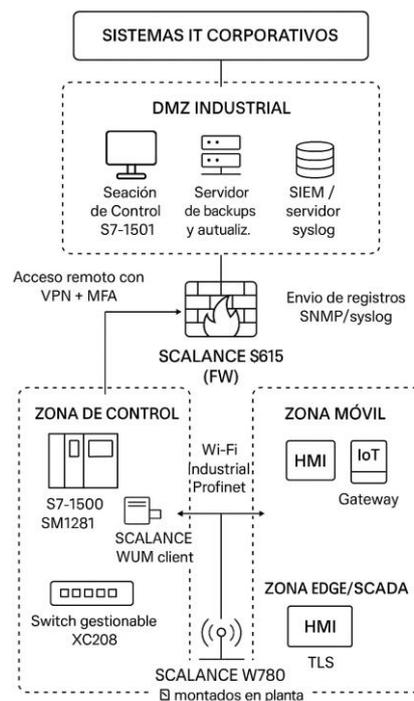


Figura 25. Zonificación de red según NIS2. [25]

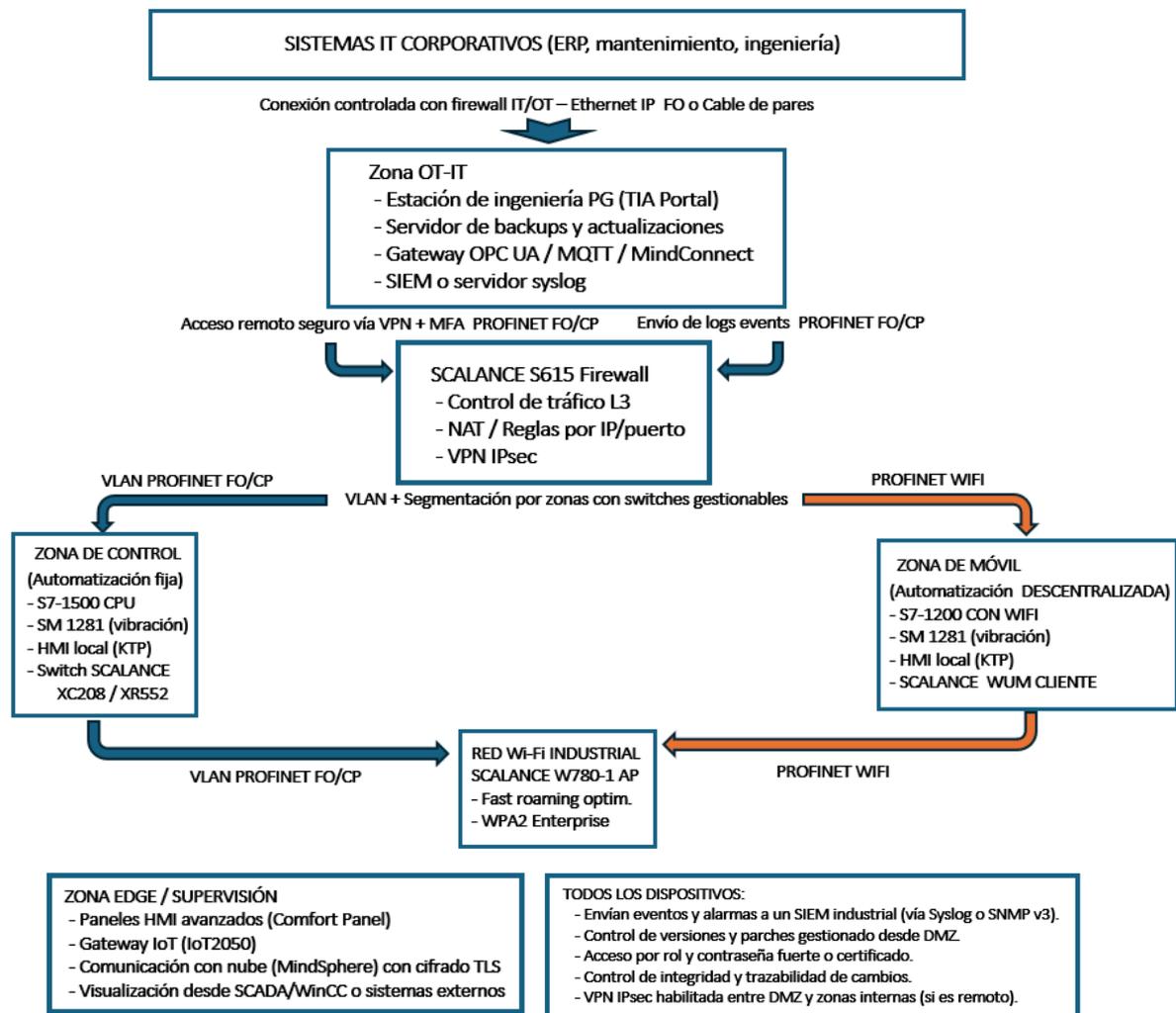


Figura 25. Zonificación de red según NIS2. [25]

Notas adicionales de implementación

- **Wi-Fi Industrial**
 - Usar SCALANCE W para alta disponibilidad, roaming sin cortes, y seguridad.
 - Posible implementación de canales redundantes o doble radio para itinerarios críticos.
- **Firewalls SCALANCE S.**
 - Uno en la frontera IT/OT (como punto fuerte de segmentación).
 - Se pueden usar reglas de inspección por protocolo, permitiendo solo Profinet
- **Actualizaciones y TIA Portal.**
 - No se recomienda acceso directo a PLCs desde IT: siempre a través de una estación segura. Opcionalmente, se puede usar TIA Portal Test Suite para verificar la integridad de proyectos.

3.4 Control de iluminación DALI en red OT según NIS2

Se incorpora un sistema de control de iluminación industrial mediante luminarias Philips GentleSpace con protocolo DALI, distribuidas por la planta. La integración se realiza de forma segura y modular respetando los principios de zonificación, trazabilidad y ciberseguridad definidos por la directiva NIS2.

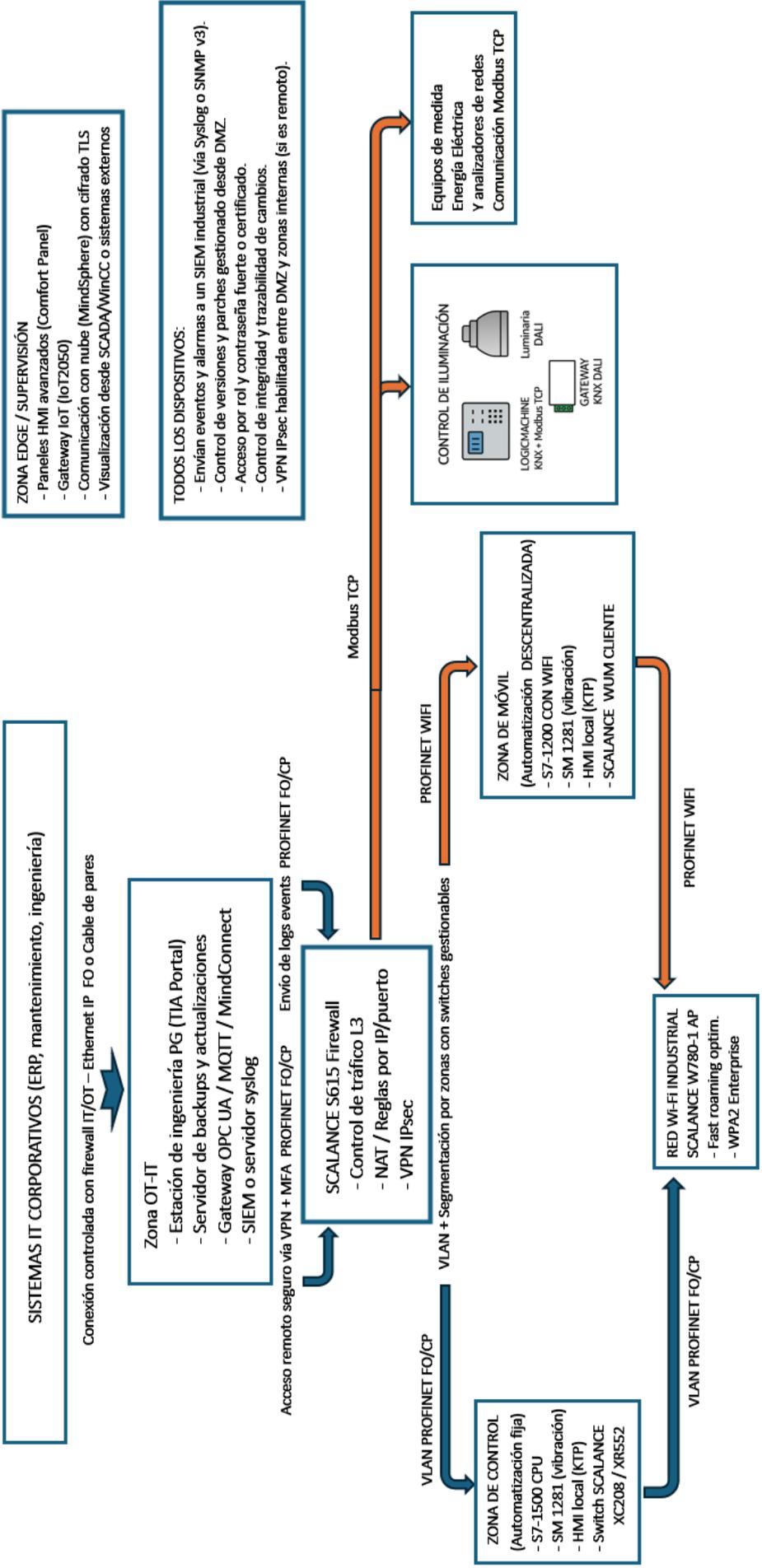
Componentes del sistema de iluminación.

- Luminarias industriales Philips GentleSpace con driver DALI.
- Pasarela DALI-KNX, que actúa como maestro DALI y traductor hacia el bus KNX.
- Controlador lógico LogicMachine, con doble interfaz
 - KNX TP1 (Twisted Pair): para control local desde pasarela.
 - Modbus TCP/IP: para integración directa con el sistema SCADA y red PLC.

El LogicMachine se sitúa en zona de control fija, conectado a la red OT vía Modbus TCP. Desde el SCADA se puede monitorizar el estado de luminarias, alarmas, fallos de balasto, y controlar escenarios de encendido/apagado o regulación según horarios, presencia o producción. El bus KNX está limitado físicamente a la sala técnica o cuadro, sin acceso desde redes IT, y sin expuesto a tráfico exterior. Los equipos de medida energética en planta también se comunican vía Modbus TCP con el SCADA, permitiendo correlacionar consumo eléctrico con comportamiento lumínico.

Requisito NIS2	Implementación
Segmentación de red	KNX aislado físicamente. Com Modbus TCP solo desde OT
Acceso seguro	Control por IP / Puerto desde SCALANCE S615
Supervisión y trazabilidad	Eventos en LogicMachine/SCADA. Fallo balasto, alarmas
Actualización y mantenimiento	Acceso solo desde zona segura de ingeniería
Gestión de riesgos	Posibilidad de definir escenarios de emergencia
Cifrado de comunicaciones	TLS en LogicMachine, VLAN dedicada en switch SCALANCE

Tabla 8. Cumplimiento NIS2 en el sistema de iluminación



Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras

A continuación, expondré una serie de conclusiones obtenidas en base a la experiencia. Las soluciones que se presentan y finalmente se deciden pueden sufrir modificaciones a lo largo del tiempo. Esto es especialmente debido a dos razones clave:

- La tecnología mejora constantemente, lo que permite que el fabricante pueda ofrecer mejores prestaciones dentro del mismo presupuesto.
- Las empresas proveedoras, como miembros esenciales de la cadena de valor, se ven en la obligación de conocer y ofrecer soluciones cada vez más avanzadas para satisfacer las necesidades de sus clientes.

En lo que respecta al servicio, es evidente la importancia de contar con ingenierías con la capacidad de ofrecer soluciones de este tipo. Los problemas tratados en este proceso son muy comunes en la industria y, de hecho, cada vez son más frecuentes en infraestructuras que requieren equipos rectificadores para adaptar energía de corriente continua a alterna (como en el caso de fuentes de energía alternativas), o rectificadores similares para alimentar baterías de corriente continua (como en la movilidad eléctrica). Es crucial contar con instalaciones que cumplan con los reglamentos eléctricos de baja tensión y que aseguren redes de comunicación estables y fiables, lo que es esencial para la correcta operación y seguridad del sistema.

En cuanto a la medición y comunicación del control de proceso, cabe resaltar la rapidez con la que la tecnología se abarata y cómo tecnologías maduras siguen siendo esenciales en determinadas instalaciones críticas. No obstante, hoy en día, en plantas e infraestructuras industriales, es cada vez más común contar con sensores ópticos para diversas aplicaciones:

- Medición
- Detección de presencia
- Captura de imágenes en procesos de calidad o sistemas de seguridad.

Un caso especialmente interesante lo representan los sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG). Aunque hoy en día su uso se limita en gran parte a entornos con fenómenos electromagnéticos intensos o exigencias extremas, su evolución apunta a una adopción más amplia y accesible en instalaciones industriales y de infraestructuras.

Finalmente, en lo que respecta al diseño de la red de comunicaciones, la correcta segmentación entre entornos OT (tecnologías operacionales) e IT (tecnologías de la información) es esencial para garantizar eficiencia, seguridad y resiliencia. Implementar redes robustas, adaptadas a los requerimientos de los usuarios, alineadas con las políticas corporativas y preparadas ante amenazas externas, es clave para proteger la infraestructura y asegurar su disponibilidad.

Digitalización e Inteligencia Artificial como horizonte

La digitalización progresiva de los entornos industriales y de edificación ha sentado las bases para la integración de tecnologías, no sé si definir emergentes pero si muy en

auge, como es el caso de la inteligencia artificial (IA). Esta evolución no solo transforma los procesos de automatización, sino que también redefine los perfiles profesionales requeridos, es habitual escuchar que perfiles profesionales van a desaparecer y cuales pueden permanecer, no obstante, es complicado saber cuales vendrán, ¿Alguien podía intuir los perfiles profesionales que ha creado internet? Pensemos en un influencer.

Volviendo al tema que nos ocupa, protocolos como Profinet han digitalizado la industria permitiendo la gestión de datos en tiempo real, de forma análoga a cómo KNX, BACnet o DALI lo han hecho en el entorno de la edificación. Esta transición desde sistemas analógicos hacia arquitecturas distribuidas, orientadas a objetos y con capacidad de interoperabilidad, abre la puerta a nuevas formas de análisis de datos, optimización energética, mantenimiento predictivo y adaptabilidad de espacios.

En este contexto, conviene comenzar a estudiar y contemplar:

- Qué tipos de datos se deben capturar en función del proceso o del espacio.
- Qué modelos de IA son más adecuados para cada caso (clasificación, regresión, redes neuronales, etc.).
- Qué infraestructuras son necesarias para garantizar conectividad, almacenamiento, procesamiento local o en la nube.
- Y, especialmente, cuál es el retorno de inversión (ROI) que se puede esperar, así como los indicadores clave de rendimiento (KPIs) asociados a la automatización inteligente.

La incorporación de planes de gobernanza tecnológica y el impulso de liderazgos transformacionales serán factores decisivos para asegurar una transición efectiva. Es imprescindible que los perfiles técnicos y profesionales evolucionen al ritmo de las necesidades reales del sector, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento de los sistemas.

Infraestructuras inalámbricas y el futuro de las comunicaciones

Actualmente, las tecnologías tratadas en este trabajo dependen fundamentalmente de medios cableados (bus físico, Ethernet industrial, fibra óptica) y, en algunos casos, de comunicaciones Wi-Fi, cuando la latencia, estabilidad y seguridad de la red lo permiten. No obstante, aún existen limitaciones regulatorias que condicionan el despliegue de nuevas soluciones.

Por ejemplo, en países como Alemania, determinadas bandas de frecuencia destinadas a comunicaciones móviles avanzadas (4G, 5G) están disponibles para uso privado industrial, lo que facilita la implementación de redes celulares dedicadas en fábricas y edificios inteligentes. En España, sin embargo, estas frecuencias siguen siendo gestionadas exclusivamente por operadores de servicios, limitando su adopción en el entorno OT.

El desarrollo de tecnologías como 5G privado, y en un futuro 6G, representa una oportunidad clave para el sector. Estas tecnologías permitirán:

- Redes más flexibles y de bajo consumo.
- Mayor densidad de dispositivos conectados.
- Latencias ultrabajas, aptas para control en tiempo real.
- Simplificación de infraestructuras físicas y reducción de costes en instalaciones.

De esta manera, la automatización podrá ser implementada en entornos hasta ahora inviables o de difícil acceso, promoviendo soluciones más sostenibles, escalables y centradas en el dato.

En definitiva, este trabajo pretende sentar las bases de una visión estructurada sobre cómo diseñar instalaciones industriales y de edificación preparadas para los retos presentes y futuros. El objetivo es ofrecer una orientación que permita trazar una hoja de ruta técnica sólida, basada en la adopción de arquitecturas abiertas, interoperables y escalables, que garanticen la sostenibilidad técnica de las instalaciones y su capacidad de adaptación ante nuevas necesidades o tecnologías emergentes.

El uso de protocolos estándar y tecnologías abiertas —como KNX, BACnet, Modbus o Profinet— no solo promueve la interoperabilidad y el crecimiento sostenible, sino que también favorece un entorno más competitivo, donde diferentes fabricantes pueden aportar valor sin quedar restringidos por soluciones propietarias cerradas. Aun así, esta apertura no está reñida con la existencia de fabricantes líderes que, gracias a su innovación continua y especialización, mantienen posiciones destacadas en determinados nichos del mercado. Su aportación también resulta fundamental para la economía local y nacional, ya que generan empleo, conocimiento y soberanía tecnológica.

Es importante destacar este equilibrio en un contexto especialmente complejo y disruptivo, donde las reglas del juego no siempre se aplican de forma homogénea. Mientras algunas empresas e industrias deben cumplir rigurosamente normativas técnicas, regulatorias o medioambientales, otras compiten en mercados internacionales sin las mismas exigencias o estándares, lo que puede derivar en situaciones de desigualdad competitiva. Esta reflexión debe ser tomada en cuenta al definir políticas industriales, estratégicas y formativas, ya que solo mediante un enfoque coherente, ético y sostenible se podrá garantizar un desarrollo tecnológico justo, competitivo y resiliente.

Bibliografía

- [1] Ugarte Arregui, J. (2024). *El atropello de las tres grandes transformaciones*. Schneider Electric.
- [2] <Manual didáctico 96> *Compatibilidad Electromagnética CEM*. Schneider Electric
- [3] <PROFIBUS> febrero 2025 [en línea]. Disponible en:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/9300001>
- [4] <PROFINET> febrero 2025 [en línea]. Disponible en:
<https://www.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/comunicacion-industrial/profinet.html>
- [5] <IO-Link. Overview> febrero 2025 [en línea]. Disponible en:
https://io-link.com/en/Technology/what_is_IO-Link.php?thisID=76.
- [6] <Sistemas de posicionamiento Laser> febrero 2025 [en línea]. Disponible en:
<https://www.leuze.com/es-es/productos/sensores-de-medicion/sensores-de-distancia-opticos/sistemas-de-posicionamiento-laser>
- [7] Informe Forense Industrial junio 2023.