

# Tecnologías de comunicación en tiempo real en entornos de automatización industrial.

Análisis de la problemática y alternativas

Francisco José Mosqueira Sáez



# Índice

1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

# Objetivos

## 1. Objetivos

2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- Analizar los **retos de las redes** en la Industria 4.0 (en concreto, en entornos sensibles al tiempo)
- Evaluar **soluciones existentes** para redes de automatización
- Realizar una **comparativa** de dichas soluciones
- Estudiar los **estándares del IEEE 802.1TSN**

# Automatización industrial: Introducción



1. Objetivos
2. Automatización industrial
  - 2.1. Introducción
  - 2.2. Industria 4.0
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- **Automatización industrial:** intervención automática que ayuda a la industria a mejorar y optimizar procesos.
- Elementos fundamentales: **PLCs, sensores y actuadores.**
- Interconexión con sistemas informáticos: **HMI, SCADA, ...**



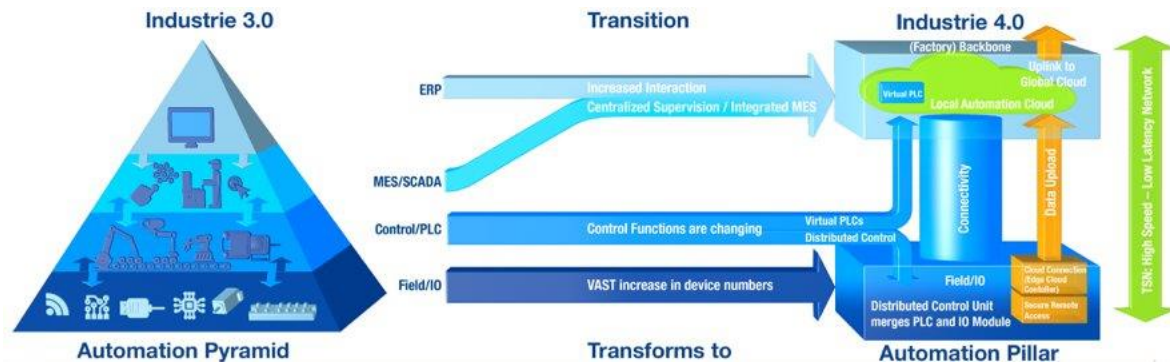
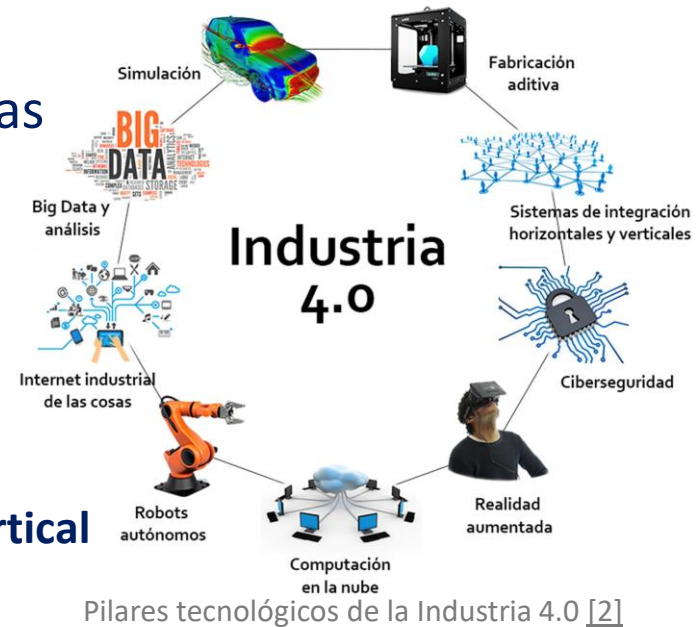
Arquitectura clásica de referencia: **pirámide de automatización** [1]

# Automatización industrial: Industria 4.0



1. Objetivos
2. Automatización industrial
  - 2.1. Introducción
  - 2.2. Industria 4.0
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- **Transformación digital** de la industria: Integración de nuevas tecnologías en procesos industriales y de negocio.
- **Pilares básicos:**
  - Información digital
  - Automatización
  - **Conectividad** → **Integración vertical** de los niveles de la pirámide



De la pirámide de automatización al pilar de automatización [3]



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
  - 3.1. Retos
  - 3.2. Clasificación
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

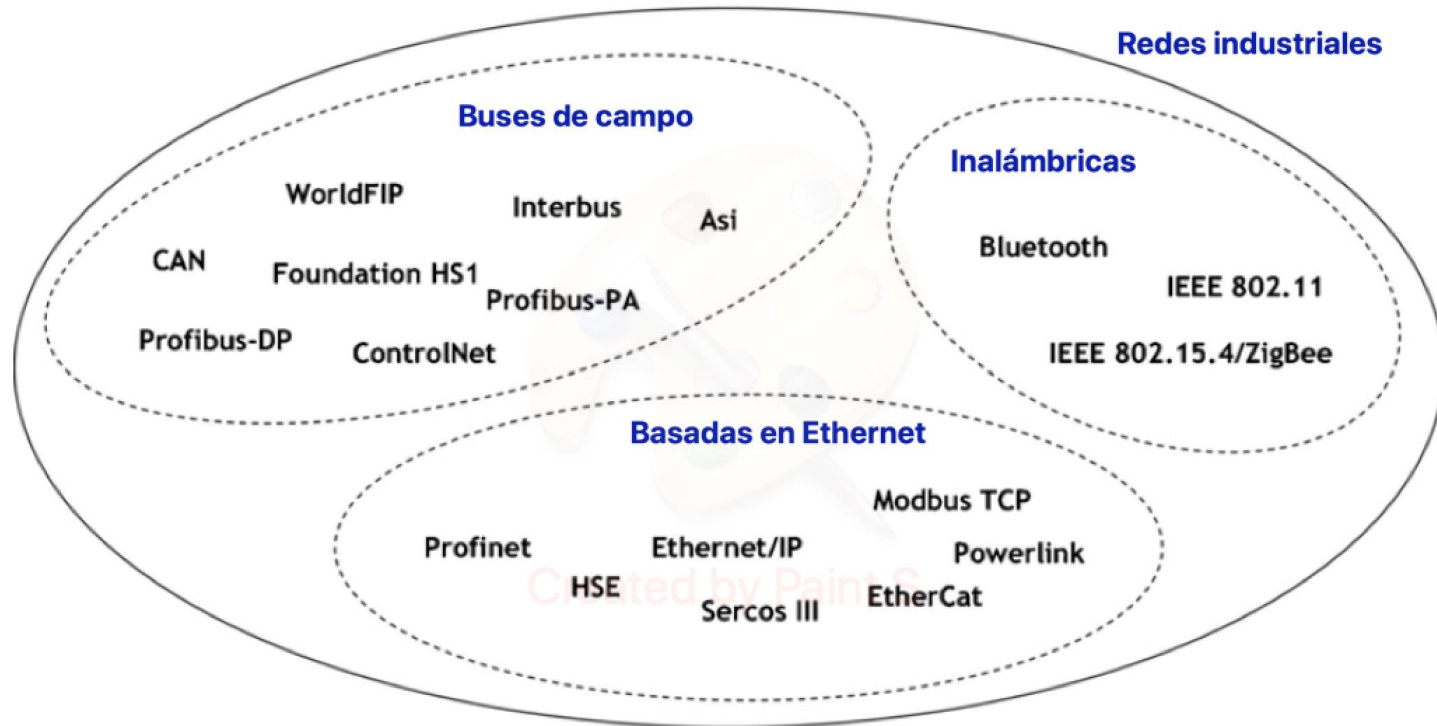
- Reto principal: Trabajo en **tiempo real**
  - Reducido tiempo de ciclo
  - **Baja latencia**
  - **Bajo jitter**
  - Determinismo → La información llega cuando se espera
  - **Ethernet emplea CSMA/CD** para acceder al medio: en caso de colisión, ¡tiempo de espera aleatorio!
- Nuevos retos:
  - Interconexión masiva de dispositivos
  - Alto ancho de banda
  - Integración de tráfico en tiempo real y tráfico no prioritario
  - Seguridad
  - Tecnologías estandarizadas

# Redes de automatización: Clasificación



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
  - 3.1. Retos
  - 3.2. Clasificación
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- Clasificación de las redes de automatización en base a sus niveles físico y de enlace:



(Imagen adaptada de [4])



# Buses de campo:

## Características generales

1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
  - 4.1. Características
  - 4.2. Acceso al medio
  - 4.3. Cuadro comparativo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- Diseñados para comunicar dispositivos de campo y de control evitando las conexiones punto a punto.
- Empleo de bus serie.
- Soportan un número de dispositivos limitado.
- Tasas de transmisión baja/media, dependiente de la distancia.
- Tradicionalmente han sido el sistema más popular.



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
  - 4.1. Características
  - 4.2. Acceso al medio
  - 4.3. Cuadro comparativo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- Generalmente, determinismo a nivel de enlace.
- Casos puntuales (ej. CAN) implementan mecanismos de arbitraje a nivel de enlace → determinismo a nivel de aplicación (ej. DeviceNet)
- Métodos:
  - Maestro/esclavo. Variantes:
    - Sondeo (maestro pregunta y esclavo responde).
    - Cíclico (maestro sincroniza y asigna *time slots* a los esclavos).
  - *Peer to peer* (*Token ring*, paso de testigo).
  - Combinaciones de las anteriores

# Buses de campo: Cuadro comparativo



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
  - 4.1. Características
  - 4.2. Acceso al medio
  - 4.3. Cuadro comparativo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

Red	Topología	Medio físico	Tasas de transmisión	Distancia máxima	Tipo de comunicación (aplicación)	Nº máx. dispositivos
DeviceNet	Bus con derivaciones	Par de cobre	125 ... 500 kbps	500 ... 100 m	Productor - Consumidor (CIP)	64
ControlNet	Bus con derivaciones / Anillo / Estrella / Árbol	Coaxial / Fibra	5 Mbps	250 ... 1000 m (20 km con repetidores / fibra)	Productor - Consumidor (CIP)	2 ... 48 (99 con repetidores / fibra)
CompoNet	Bus con derivaciones (3 niveles en total)	Par trenzado / cable plano	93,75 kbps ... 4 Mbps	500 m ... 30 m	Productor - Consumidor (CIP)	384
MODBUS serie	Bus con derivaciones	Par de cobre (RS232 / RS485)	19,2 kbps / 9,6 kbps ... 10 Mbps	20 m / 1000 m ... 12 m	Cliente/Servidor	248
MODBUS+	Token Ring	Par trenzado	1 Mbps	450 m (1.8 km con repetidores, más con fibra)	Cliente/Servidor	64
PROFIBUS DP	Bus / Árbol	Par de cobre (RS485) / Fibra	9,6 kbps ... 12 Mbps	1200 m ... 100 m (100 km con fibra)	Maestro/Esclavo	126
PROFIBUS PA	Bus / Árbol	Par de cobre (RS485)	31,25 kbps	1900 m	Maestro/Esclavo	32 (126 con repetidores)
SERCOS I / II	Anillo	Fibra	2 Mbps ... 16 Mbps	50 m (fibra plástica) 250 m (fibra vidrio)	Maestro/Esclavo	255



# Ethernet industrial: Características generales



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
- 5.1. Características
- 5.2. Acceso al medio
- 5.3. Cuadro comparativo
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- Empleo de Ethernet a nivel de enlace y físico
- Ventajas:
  - Mayor ancho de banda
  - Mayor número de dispositivos
  - Compatibilidad con otras redes
  - Convivencia de múltiples flujos de datos
  - *Hardware* común, económico
- Paulatina sustitución de buses de campo por redes industriales basadas en Ethernet
  - En 2018 por primera vez se instalan más nodos industriales basados en Ethernet que de bus de campo.
  - En 2019 por primera vez se instalan menos nodos de bus de campo que el año anterior.



# Ethernet industrial: Acceso al medio



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
  - 5.1. Características
  - 5.2. Acceso al medio
  - 5.3. Cuadro comparativo
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

- MAC Ethernet estándar emplea CSMA/CD → **latencia aleatoria**
- Control de latencia:
  - Optimizaciones (Ej. Prescindir de TCP/IP; cuidado diseño de red)
  - Extensiones *software* (Ej. Control por encima de la capa MAC)
  - Modificaciones *software* (Ej. Capa MAC específica)
  - Modificaciones *hardware* (Ej. Conmutadores integrados)
  - Combinaciones de las anteriores
- Métodos:
  - Maestro/esclavo. Variantes:
    - Sondeo (maestro pregunta y esclavo responde).
    - Cíclico (maestro sincroniza y asigna *time slots* a los esclavos).
  - *Peer to peer* (*Token ring*, paso de testigo).
  - Combinaciones de las anteriores
- Empleo de CSMA/CD durante fase de tráfico no prioritario

# Ethernet industrial: Cuadro comparativo



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
  - 5.1. Características
  - 5.2. Acceso al medio
  - 5.3. Cuadro comparativo
6. Estándares TSN
7. Conclusiones

Red	Tipo de comunicación (aplicación)	Determinismo	Topología	Medio físico	Tasas de transmisión	Distancia máxima	Nº máx. dispositivos
EtherNet/IP	Productor/Consumidor (CIP)	No	- Bus - Estrella - Árbol - Anillo - Combinaciones de las anteriores	- Par de cobre - Fibra	- 100 Mbps - 1 Gbps - 10 Gbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Virtualmente ilimitados
MODBUS TCP	Cliente/Servidor	No					
PROFINET	Productor/Consumidor	Sí					
POWERLINK	- Productor/Consumidor - Cliente/Servidor - Maestro/Esclavo	Sí					
EtherCAT	- Maestro/Esclavo - Esclavo/Esclavo - Maestro/Maestro	Sí					
SERCOS III	- Maestro/Esclavo - Esclavo/Esclavo - Maestro/Maestro	Sí	- Anillo - Bus	- Par de cobre - Fibra	100 Mbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	512



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
  - 6.1. Introducción
  - 6.2. Componentes
  - 6.3. Control de latencia
  - 6.4. Sincronización, fiabilidad y gestión
7. Conclusiones

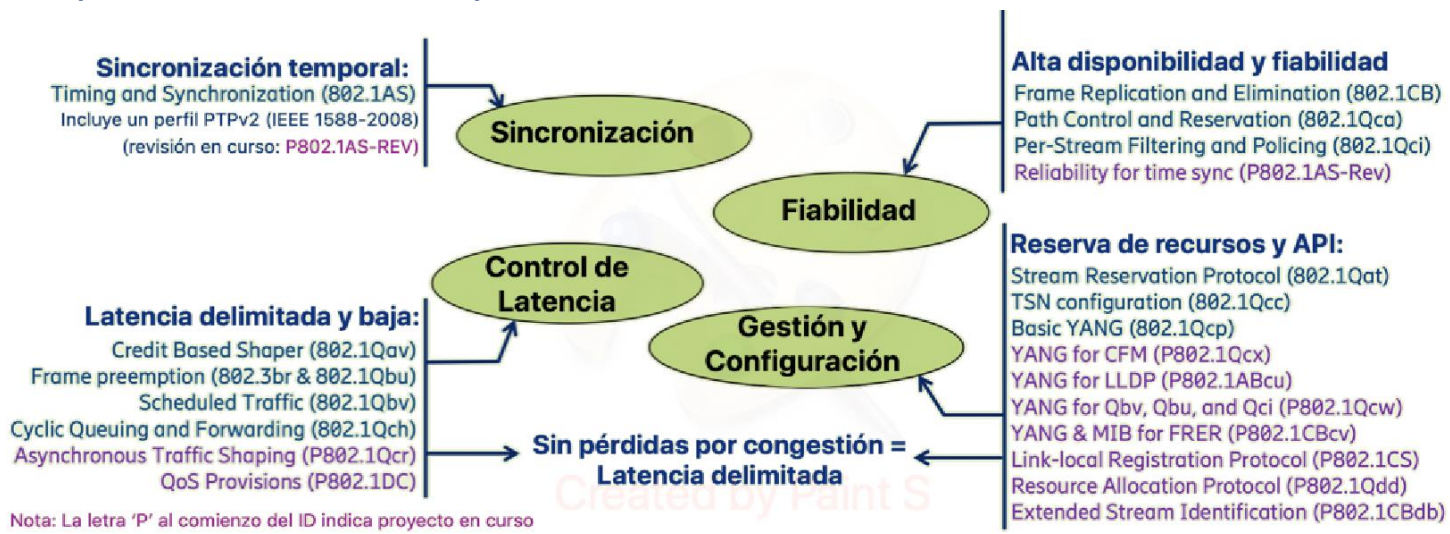
- Estándares TSN: Conjunto de estándares desarrollados por el IEEE 802.1 *Time-Sensitive Networking Task Group*
- Resuelven la necesidad de estandarizar soluciones para aplicaciones sensibles al tiempo sobre Ethernet:
  - Control de latencia y *jitter*
  - Calidad de servicio (QoS)
  - Reserva de recursos
  - Redundancia y recuperación ante fallos
- Se centran en las capas físicas y de enlace

# Estándares TSN: Componentes



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
  - 6.1. Introducción
  - 6.2. Componentes
  - 6.3. Control de latencia
  - 6.4. Sincronización, fiabilidad y gestión
7. Conclusiones

- Amplio número de estándares desarrollados y en curso para cubrir múltiples funciones:



- Gran variedad de opciones → Estandarización de “perfiles” para una aplicación determinada:

Audio Video Bridging (802.1BA)	Fronthaul (802.1CM)	Industrial Automation (IEC/IEEE P60802)	Automotive In-Vehicle (P802.1DG)	Service Provider (P802.1DF)
--------------------------------	---------------------	---	----------------------------------	-----------------------------

(Imágenes adaptadas de [5])



# Estándares TSN: Control de latencia



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
  - 6.1. Introducción
  - 6.2. Componentes
  - 6.3. Control de latencia
  - 6.4. Sincronización, fiabilidad y gestión
7. Conclusiones

## • Funciones de control de latencia

- Empleo de **colas** para conformado de tráfico, aplicando políticas específicas para el **drenado** de las colas
  - 802.1Qav (**CBS**): Drenado conducido por eventos (**créditos**)
  - 802.1Qbv (**TAS**): Drenado conducido por tiempo (**time slots**)
  - 802.1Qch (**CQF**): Drenado conducido por tiempo (**almacenamiento y reenvío reordenado** por prioridad en cada ciclo)
  - P802.1Qcr (**ATS**): Drenado conducido por eventos (**políticas de drenado y control de ancho de banda**)
- Interrupción de transmisiones por prioridad
  - 802.1Qbu/802.3br (**Preemption**): Permite **interrumpir** una transmisión no prioritaria para enviar tráfico urgente, **reanudándose** la transmisión posteriormente, y **reensamblándose** los fragmentos en destino.



# Estándares TSN: Sincronización, fiabilidad y gestión



1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
  - 6.1. Introducción
  - 6.2. Componentes
  - 6.3. Control de latencia
  - 6.4. Sincronización, fiabilidad y gestión
7. Conclusiones

- Funciones de **sincronización**

- IEEE 802.1AS: Permite sincronizar los relojes internos de los nodos. Incluye un perfil IEEE 1588.

- Funciones de **fiabilidad**

- 802.1Qca (**PCR**): Reserva y restauración de caminos alternativos
- 802.1CB (**FRER**): Redundancia transparente
- 802.1Qci (**PSFP**): Políticas de filtrado de tráfico “problemático”
- 802.1Qcz: **Aislamiento de la congestión** extremo a extremo
- P802.1AS-Rev: Funciones de **sincronización con fiabilidad**

- Funciones de **gestión y configuración**

- 802.1Qat (**SRP**): Reserva de recursos de red para flujos concretos
- 802.1Qcc: **Mejoras SRP** para configuración TSN.
- 802.1Qcp (**YANG**): **Modelo de datos** para la definición de **configuraciones y estado operacional** de dispositivos

# Conclusiones

1. Objetivos
2. Automatización industrial
3. Redes de automatización
4. Buses de campo
5. Ethernet industrial
6. Estándares TSN
- 7. Conclusiones**

## ✓ Objetivos alcanzados:

- ✓ Analizar los **retos de las redes** en la Industria 4.0:
  - ✓ Reto básico: determinismo
  - ✓ Nuevos retos: ancho de banda, masificación de dispositivos, compatibilidad, convivencia de distintos tráficos, etc.
- ✓ Evaluar **soluciones existentes** para redes de automatización
  - ✓ Buses de campo → **Cumplen el reto básico**
  - ✓ Ethernet industrial → **Válido en tiempo real y, además, válido en Industria 4.0**
- ✓ Comparativa de las soluciones existentes
  - ✓ **¡Multitud de tecnologías!** → **Aparecen los estándares TSN**
- ✓ Estudiar los **estándares del IEEE 802.1TSN**
  - ✓ Funciones de sincronización
  - ✓ Funciones de control de latencia
  - ✓ Funciones de fiabilidad
  - ✓ Funciones de gestión

## x Líneas de trabajo futuras

- x Estudio de redes industriales inalámbricas y estándares TSN
- x Modelado de escenarios TSN



# Contacto



Francisco José Mosqueira Sáez

[fjmosqueira@uoc.edu](mailto:fjmosqueira@uoc.edu)  
[fjmosqueira@gmx.com](mailto:fjmosqueira@gmx.com)

Ing. Técnico de Telecomunicación, esp. Telemática (UPM)  
Graduado en Ing. en Tecnologías de Telecomunicación (ULPGC)  
Estudiante de Máster Universitario en Ing. De Telecomunicación (UOC)

# Fuentes de imágenes



- [1] S. Asensio, E. Dimonte, S. Linares, I. Paredes, M. García-Menéndez, A. Rodríguez , J. Valiente y A. Flecha, «Guía de Bolsillo: Ciberseguridad en la Pirámide de Automatización Industrial,» Centro de Ciberseguridad Industrial, 2017.
- [2] industria-4.blogspot.com, «Los 9 pilares tecnológicos de la Industria 4.0,» 16 06 2015. [En línea]. <http://industria-4.blogspot.com/2015/06/los-9-pilares-tecnologicos-de-la.html> [Último acceso: 12 01 2020].
- [3] D. Greenfield, «Automation Networks: From Pyramid to Pillar,» Automation World, 02 11 2017. [En línea].  
<https://www.automationworld.com/products/networks/blog/13317982/automation-networks-from-pyramid-to-pillar> [Último acceso: 12 01 2020].
- [4] S.-L. Jämsä-Jounela, «Future trends in process automation,» Annual Reviews in Control, vol. 31, pp. 211-220, 2007.
- [5] J. Farkas, «IEEE 802.1 TSN – An Introduction,» 16 07 2019. [En línea]  
<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1298-00-00be-ieee-802-1-tsn-an-introduction.pdf> [Último acceso: 12 01 2020]