

Jornadas de Automática

GrafcetWeb: de la simulación en la nube al control real de la planta física

Paula Martínez Antona^a, Sergio Illana Rico^b, Alejandro Sánchez García^b, Elisabet Estévez Estévez^b, Ildefonso Ruano Ruano^{a,*}

^a Dpto. de Ingeniería de Telecomunicación, A3-402, Universidad de Jaén, Paraje Las Lagunillas, s.n., 23071, Jaén, España.

^b Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática, A3-402, Universidad de Jaén, Paraje Las Lagunillas, s.n., 23071, Jaén, España.

To cite this article: Martínez Antona, P., Illana Rico, S., Sanchez Garcia, A., Estevez Estevez, E., Ruano Ruano, I. 2026. GrafcetWeb: From Cloud Simulation to Real Control of the Physical Plant. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13721>

Resumen

Este trabajo presenta GrafcetWeb, una plataforma web innovadora orientada al diseño, simulación y ejecución de diagramas GRAFCET para su uso en la docencia de la automatización industrial. El sistema emula la Parte Operativa de un PLC, facilitando a los estudiantes de ingeniería la validación de secuencias lógicas de control sin riesgos sobre la maquinaria real, para posteriormente desplegarlas de forma sincronizada con una planta física. Basada en tecnologías web modernas como React y React Flow, la herramienta elimina la dependencia de instalaciones locales, incorporando funcionalidades avanzadas como contadores, temporizadores y supervisión visual en tiempo real mediante cámaras IP. El artículo detalla la arquitectura del sistema, las tecnologías involucradas y un caso de estudio práctico, concluyendo con las perspectivas de su próxima implantación en asignaturas de automatización de la Universidad de Jaén.

Palabras clave: GRAFCET, Controladores lógicos programables, Laboratorios virtuales y remotos, Internet de las cosas, Modelado y simulación de sistemas de eventos discretos, Enseñanza de la automática.

GrafcetWeb: From Cloud Simulation to Real Control of the Physical Plant

Abstract

This paper introduces GrafcetWeb, an innovative web-based platform tailored for the design, simulation, and execution of GRAFCET diagrams in industrial automation education. Unlike traditional isolated simulators, GrafcetWeb functions as a Control Digital Twin, enabling real-time bidirectional interaction with physical Programmable Logic Controllers (PLCs) via the IoT MQTT protocol. The system emulates the Operative Part of a PLC, allowing engineering students to validate logical automation sequences risk-free before deploying them synchronously with a physical plant. Built on modern web technologies like React and React Flow, the tool removes local installation dependencies while integrating advanced functionalities such as counters, timers, and real-time visual supervision via IP cameras. The article details the system architecture, the technologies involved, and a practical case study, concluding with perspectives on its upcoming implementation in automation courses at the University of Jaén.

Keywords: GRAFCET, Programmable logic controllers, Virtual and remote labs, Internet of Things, Discrete event modelling and simulation, E-learning in control engineering.

1. Introducción

En el panorama contemporáneo impuesto por la Industria 4.0, la convergencia estructural entre las Tecnologías de la Información (IT) y las Tecnologías de la Operación (OT) ha redefinido los cimientos de la automatización y el control de

procesos (Patera, 2022). Esta profunda transformación digital exige una reconfiguración de los planes de estudio universitarios; los futuros ingenieros ya no solo deben dominar la lógica secuencial clásica y los lenguajes de programación tradicionales, sino que también requieren competencias críticas en arquitecturas distribuidas,

virtualización de sistemas complejos, conectividad IoT y monitorización remota en tiempo real.

Dentro de los vectores tecnológicos que lideran esta revolución industrial, los entornos de virtualización y simulación interactiva avanzada han emergido como herramientas indispensables para la representación dinámica y el análisis de sistemas físicos complejos (Sharma, 2022). Al nutrirse de flujos de datos continuos y bidireccionales, estas plataformas virtuales permiten reproducir con alta fidelidad el comportamiento dinámico de las líneas de producción operativas. Esto facilita el despliegue de metodologías avanzadas como la Puesta en Marcha Virtual (Virtual Commissioning), la optimización asíncrona de secuencias y el diagnóstico predictivo de fallos sin interferir en los flujos de trabajo reales.

A nivel de planta, el núcleo del control industrial sigue estando gobernado por los Controladores Lógicos Programables (PLCs). La programación de estos dispositivos se sustenta, en gran medida, en la metodología formal GRAFCET (Gráfico Funcional de Control de Etapas y Acciones), un estándar internacional consolidado bajo la norma IEC 60848 y ratificado a nivel nacional por la norma UNE-EN 60848:2022 (Asociación Española de Normalización, 2022).

Para romper el aislamiento de los entornos de desarrollo locales y construir canales de información bidireccionales y deterministas entre los algoritmos lógicos y el hardware físico, los protocolos de mensajería ligera han cobrado un protagonismo absoluto. En este escenario, MQTT (Zunino, 2024) se ha erigido como el estándar ciberfísico dominante, gracias a su arquitectura de publicación/suscripción, su reducida sobrecarga de red (overhead) y su excelente comportamiento en entornos con limitaciones de ancho de banda o latencias variables.

Sin embargo, el traslado de este ecosistema tecnológico al ámbito de la educación superior plantea desafíos pedagógicos y logísticos de envergadura:

- **Restricciones de acceso:** Las plantas piloto y las maquetas didácticas de los laboratorios universitarios presentan una disponibilidad temporal y espacial severamente limitada.
- **Integridad del hardware:** Los errores lógicos de programación intrínsecos al proceso de aprendizaje de los alumnos conllevan un riesgo real de colisión mecánica o avería eléctrica en equipos costosos.
- **Aislamiento de los simuladores clásicos:** Las herramientas tradicionales de software estático operan de forma aislada, privando al estudiante de enfrentarse a los problemas reales de la ingeniería de planta, tales como el retraso de red, la pérdida de paquetes o el mapeo asíncrono de variables.

Para dar respuesta a esta triple problemática, este trabajo presenta GrafcetWeb (Martínez, 2026), una plataforma web de última generación concebida para la modelización, simulación y ejecución remota de diagramas GRAFCET que opera como un entorno de control ciberfísico unificado. GrafcetWeb proporciona un ecosistema seguro, altamente accesible desde cualquier navegador estándar y escalable bajo demanda.

A través de esta herramienta, los estudiantes pueden diseñar lógicas secuenciales complejas y, simultáneamente, enlazarlas e interactuar en tiempo real con maquetas físicas remotas mediante un broker MQTT. El resultado es una experiencia pedagógica inmersiva que reduce la brecha entre el diseño conceptual y la implantación en el mundo real.

El resto de este artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 profundiza en las tecnologías utilizadas en el desarrollo y su impacto en la educación; la Sección 3 describe detalladamente la arquitectura y características de GrafcetWeb; la Sección 4 presenta un caso de estudio real sobre una planta neumática didáctica; y, finalmente, la Sección 5 recoge las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

2. Fundamentos tecnológicos para la enseñanza virtualizada de la automática industrial

La modernización de la enseñanza en el área de la automática requiere una convergencia armónica entre las metodologías de control secuencial tradicionales, los nuevos paradigmas de aprendizaje interactivo y las herramientas de software de última generación. En esta sección se analiza el estado actual de la simulación avanzada en la docencia de la automatización, los fundamentos normativos del estándar GRAFCET como pilar del control discreto y el papel de las tecnologías web como infraestructura ciberfísica habilitadora para la emulación y validación de sistemas industriales.

2.1. Virtualización y simulación avanzada en la docencia

La integración sistemática de plataformas de simulación avanzada y entornos virtuales en la educación superior en ingeniería proporciona escenarios de aprendizaje seguros, flexibles y altamente estimulantes para el alumnado (Arroyo, 2025).

Investigaciones recientes publicadas en revistas de alto impacto (Ortiz, 2025) aportan evidencias empíricas sobre cómo el aprendizaje activo basado en la interacción con laboratorios virtuales interactivos optimiza las competencias de supervisión y control de procesos industriales en estudiantes de ingeniería. Estos entornos permiten desglosar la complejidad operativa, reduciendo significativamente la carga cognitiva del estudiante y acelerando la asimilación conceptual de los sistemas dinámicos multivariable.

Asimismo, la literatura científica subraya la relevancia de la virtualización de activos como un puente metodológico crítico para acortar la brecha existente entre la teoría académica y las demandas tecnológicas reales de la Industria 4.0 (Tao et al, 2019), permitiendo a las instituciones académicas ofrecer formación práctica alineada con los estándares de la industria moderna sin incurrir en costes prohibitivos de mantenimiento de hardware.

2.2. GRAFCET y Control Secuencial

GRAFCET es un Lenguaje gráfico que nace en Francia en 1977 derivado de las Redes de Petri, idóneo para la representación clara de sistemas secuenciales. Formalizado internacionalmente (IEC-60848) (IEC, 2013), basa su funcionamiento en la alternancia estricta de etapas (que representan los estados estables del proceso) y transiciones

(que rigen la evolución del sistema mediante condiciones lógicas) (Figura 1). Su integración en la docencia permite a los alumnos abstraer el problema de control de forma independiente a la arquitectura hardware del autómat, focalizándose puramente en la lógica del proceso (Julius, 2017).

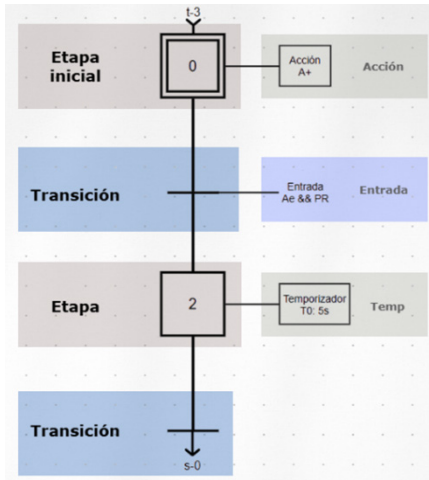


Figura 1: Ejemplo de diagrama Grafcet.

2.3. Protocolos Industriales IoT: MQTT vs. Tradicionales

Mientras que protocolos OT tradicionales como ModBus (Modbus organization, 2006) o la potente arquitectura OPC UA (OPC Foundation, 2025) son robustos en redes de planta, presentan cierta rigidez y sobrecarga (overhead) a la hora de integrarse con aplicaciones web orientadas a la docencia. MQTT soluciona este problema mediante un broker intermedio que gestiona "tópicos" (Topics) a los que los clientes pueden suscribirse o publicar información. Este desacoplamiento asíncrono lo hace perfecto para conectar navegadores web (PLC Virtual) con PLCs físicos, tolerando fluctuaciones de red e integrándose a la perfección en un ecosistema de Single-Page Applications (SPA) (Cho & Noh, 2024). Existen varias versiones de este protocolo, la última se publicó en el año 2019 (Oasis MQTT TC, 2019).

2.4. Tecnologías de Entorno Web

Para lograr la máxima accesibilidad multiplataforma, GrafcetWeb se ha desarrollado empleando JavaScript y la biblioteca React para la interfaz de usuario, orquestado

mediante el empaquetador Vite (Vite, s.f.). Específicamente, el renderizado de los diagramas se sustenta en la librería de código abierto React Flow (Xyflow, 2021), que proporciona una gestión eficiente de nodos interactivos, lienzo infinito y renderizado dinámico, superando las limitaciones visuales de soluciones Java clásicas.

3. GrafcetWeb: Arquitectura y Características

GrafcetWeb es el resultado de una evolución tecnológica disruptiva respecto a su predecesor, "EditorGrafcet" (Estepa, 2022), una herramienta académica estática desarrollada originalmente en Java mediante Easy JavaScript Simulations (EJS, hoy EJS) (Esquembre, 2004). La migración a una arquitectura web moderna no solo elimina las dependencias del sistema operativo y las instalaciones locales, sino que trasciende la barrera de la simulación teórica al dotar a la plataforma de hiperconectividad.

3.1. Arquitectura del Sistema

La arquitectura lógica de GrafcetWeb se basa en el patrón de capas, lo que garantiza su modularidad e interoperabilidad (Figura 2):

1. **Capa de Modelo (Núcleo Lógico):** Encapsula el motor de inferencia GRAFCET. Evalúa un bucle interno con una periodicidad base de 200 ms, escaneando el estado de las etapas activas, comprobando receptividades y resolviendo las ecuaciones booleanas de las transiciones.
2. **Capa de Persistencia:** Maneja archivos JSON para la gestión de proyectos. A diferencia de las herramientas rígidas, GrafcetWeb utiliza un fichero de configuración (default_config.json) que mapea dinámicamente las señales de I/O de cualquier planta física.
3. **Capa de Comunicación:** Implementa el cliente MQTT. Utiliza WebSockets para mantener un enlace persistente con el Broker (ej., Mosquitto o Shiftr.io). El sistema se suscribe a TopicSub para recibir el estado de los sensores físicos (entradas I) y publica las órdenes de actuación sobre la planta (salidas Q) en TopicPub.
4. **Capa de Interfaz y Representación Visual:** Utilizando React Flow, proporciona un diseño minimalista donde el alumno interactúa directamente con los nodos mediante funciones de arrastrar y soltar (drag & drop).

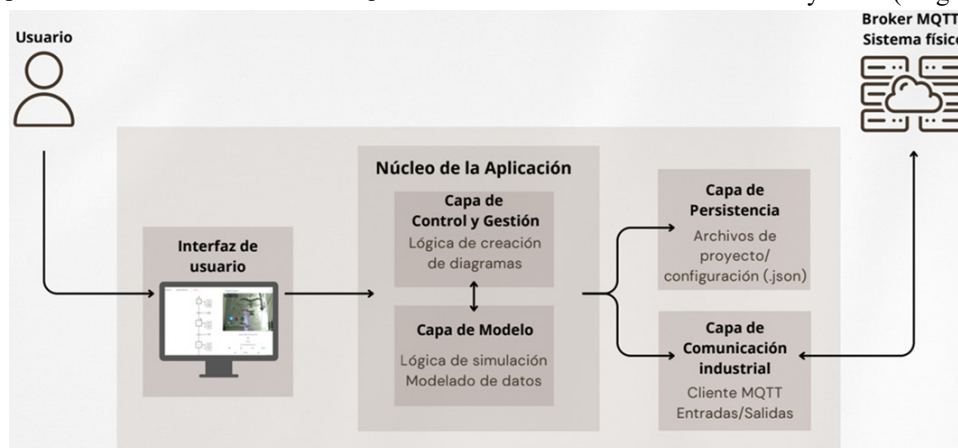


Figura 2: Arquitectura de la Herramienta GrafcetWeb.

3.2. Nuevas Funcionalidades y Utilidad Docente

Respecto a las alternativas comerciales o versiones previas, GrafcetWeb es una herramienta gráfica que introduce mejoras funcionales enfocadas en la experiencia educativa:

- **Variables Complejas:** Incorporación nativa de funciones de temporización (TON) y contadores incrementales/decrementales. Estos elementos se procesan en el entorno web y sus estados lógicos pueden condicionar el avance de secuencias físicas, descargando al autómatas de estas tareas o emulándolas completamente.
- **Supervisión Híbrida Integrada:** La plataforma incorpora un panel de monitorización que muestra un flujo de vídeo en directo mediante una cámara IP que apunta a la maqueta. El alumno observa, en la misma pantalla, cómo el progreso secuencial iluminado del diagrama GRAFCET se traduce milisegundos después en el movimiento físico de la planta.
- **Roles duales:** El sistema puede operar como Controlador Centralizado (donde el PLC físico actúa como simple pasarela de I/Os) o como Gemelo Digital de Supervisión (donde el PLC ejecuta su propio código local y GrafcetWeb monitoriza e introduce condiciones suplementarias de control superior).

4. Caso de estudio y Aplicación en Aula

Para demostrar la viabilidad y facilidad de uso de GrafcetWeb, se expone un caso de estudio diseñado para el laboratorio de automática utilizando una planta física compuesta por dos cilindros neumáticos (Cilindro A y Cilindro B) controlados por un PLC Siemens S7-1214 DC/DC/DC, dotada además de pulsadores físicos y pilotos luminosos. El esquema físico de comunicaciones en el que se implementó este caso se muestra en la Figura 3.

El flujo de trabajo que experimenta el estudiante se resume en los siguientes pasos:

- 1) **Carga de Configuración (Mapeo de Variables):** El estudiante inicia sesión en GrafcetWeb e importa el archivo .JSON proporcionado por el profesor. Inmediatamente, la interfaz se adapta al sistema de estudio; al desplegar los menús contextuales para insertar acciones o entradas, la herramienta autocompleta las opciones exactas mapeadas a la planta (ej. Sensores de posición: Ar, Ae, Br, Be; Actuadores: A+, A-, B+; Pulsadores: PG, PR, PB).
- 2) **Diseño Secuencial Intuitivo:** Haciendo clic sobre la "Etapa 0" inicial, el alumno dibuja visualmente la secuencia. Puede añadir transiciones anidadas evaluando expresiones lógicas compuestas, por ejemplo: PG && Ae && Be (pulsador verde activado y ambos cilindros retraídos).
- 3) **Ejecución y Sincronización MQTT:** Al pulsar "Simular con cámara", el diagrama queda bloqueado para edición y se inicia la transmisión MQTT. GrafcetWeb asume el control: al franquear una transición, se resalta en verde la etapa activa en el lienzo y la orden de extensión del cilindro A (Acción A+) se codifica en tramas hexadecimales (ej. QB0=2) enviándose a TopicPub.
- 4) **Retroalimentación Física (Hardware-in-the-Loop):** El PLC Siemens real, suscrito a dicho tópico, extiende físicamente el cilindro. Una vez que el sensor de final de carrera físico Ar se excita, el PLC envía la actualización a TopicSub. GrafcetWeb recibe el cambio, franquea la siguiente transición lógicamente, y el estudiante presencia, a través del panel de vídeo en la misma interfaz, la correlación perfecta entre el diagrama virtual y la acción real (Figura 4).

Esta metodología elimina el temor del estudiante a los entornos industriales cerrados, reduciendo la fricción tecnológica inicial y permitiendo que los conceptos secuenciales abstractos se visualicen y materialicen de manera inmediata.

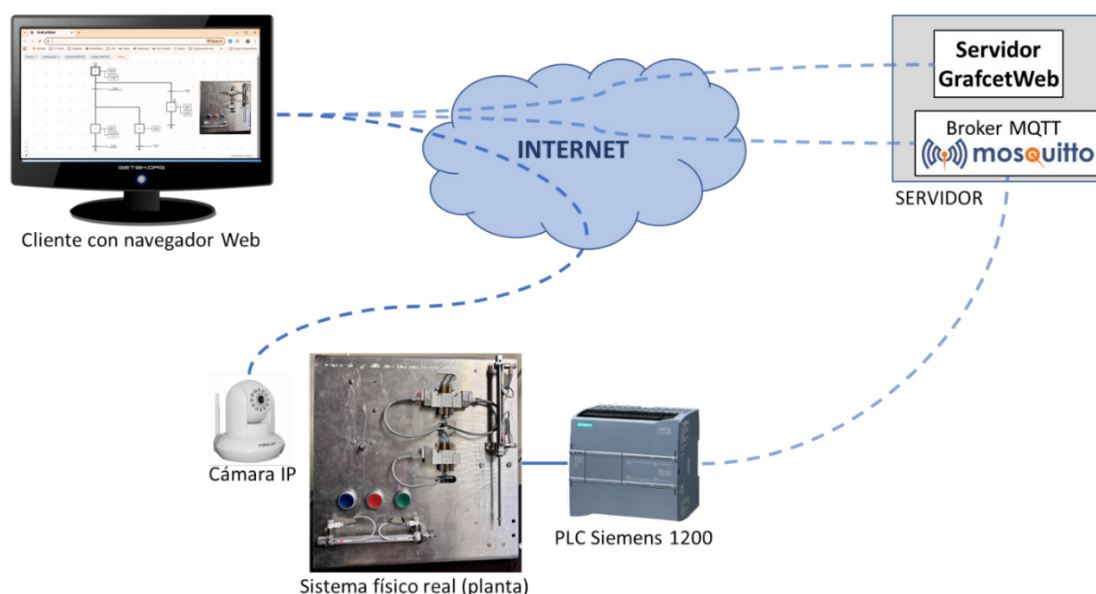


Figura 3: Esquema de comunicaciones del caso de estudio

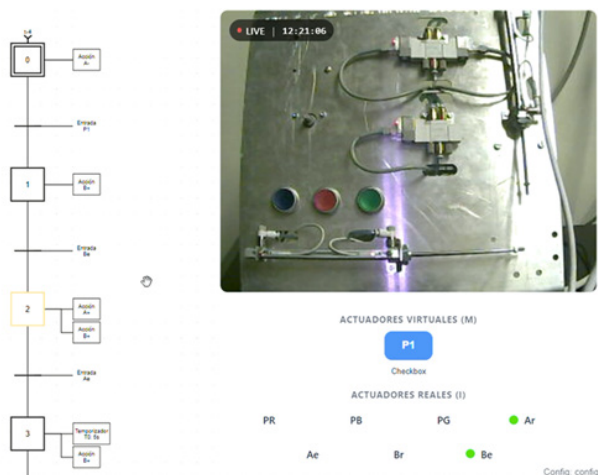


Figura 4: Interfaz de usuario de GrafcetWeb

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

La conceptualización y desarrollo de GrafcetWeb supone un avance cualitativo en las metodologías docentes aplicadas a la ingeniería en automática. El salto de un simulador estático local a una plataforma web descentralizada democratiza el acceso de los alumnos a infraestructuras industriales de alto coste. Gracias a la simplicidad y robustez del protocolo MQTT, el sistema ha demostrado ser capaz de intercambiar información de control en tiempo real con hardware físico de grado industrial (Siemens), logrando latencias visualmente aceptables para fines formativos.

Actualmente, GrafcetWeb constituye una prueba de concepto plenamente funcional y exitosa, si bien aún no ha sido introducida formalmente en las aulas de la Universidad de Jaén. No obstante, el área de Ingeniería de Sistemas y Automática, del departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, de la Universidad de Jaén ha programado su integración en las asignaturas troncales de automatización industrial para los próximos cursos académicos, con la expectativa de incrementar la participación activa del alumnado.

A medio y largo plazo, las líneas de investigación y desarrollo futuro para GrafcetWeb contemplan las siguientes líneas de trabajo:

- **Integración avanzada de estructuras normativas:** Mejora visual y algorítmica para gestionar ramificaciones paralelas estrictas (Divergencias/Convergencias AND u OR) de acuerdo riguroso a la norma IEC-60848.
- **Optimización de Interfaz (UX/UI):** Implementación de cámaras con "seguimiento activo" (Auto-Fit dinámico) del token a través del lienzo infinito para esquemas GRAFCET muy extensos.
- **Soporte Multiprotocolo Industrial:** Creación de una capa de abstracción de red que permita interconectar la plataforma no solo con MQTT, sino con otros estándares IT/OT del paradigma de la Industria 4.0, como ModBus TCP y OPC UA.
- **Persistencia en la nube y Colaboración:** Evolucionar hacia un modelo colaborativo (mediante WebSockets) donde múltiples alumnos puedan coeditar un mismo diagrama GRAFCET simultáneamente en la nube.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto del Plan Nacional PID2023-150832OB-I00; y por la Junta de Andalucía a través del proyecto DGP-PIDI-2024-01419.

Referencias

- Asociación Española de Normalización, 2022. Lenguaje de especificación GRAFCET para diagramas funcionales en secuencia (Norma UNE-EN 60848:2022). Recuperado el 26/05/2026: <https://tienda.aenor.com/p/norma-une-en-60848-2022-n0069711>
- Arroyo, A., et al., 2025. Dual approach to industrial automation education: digital twin and virtual twin for enhanced learning. EDULEARN25 Proceedings, pp. 6686-6693. DOI: [10.21125/edulearn.2025.1644](https://doi.org/10.21125/edulearn.2025.1644)
- Cho, Y., & Noh, S. D., 2024. Design and Implementation of Digital Twin Factory Synchronized in Real-Time Using MQTT. Machines, 12(11), 759. DOI: [10.3390/machines12110759](https://doi.org/10.3390/machines12110759)
- Esquembre, F. (2004). Easy Java Simulations: A software tool to create scientific simulations in Java. Computer Physics Communications, 156(2), 199-204. DOI: [10.1016/S0010-4655\(03\)00440-5](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(03)00440-5)
- Estepa González, A., Estévez Estévez, E. y Sánchez García, A., 2022. Simulador Grafcet para asignaturas de automatización. TFG, Universidad de Jaén. Recuperado el 26/05/2026: <https://hdl.handle.net/10953.1/19702>
- International Electrotechnical Commission, 2013. IEC 60848:2013 GRAFCET specification language for sequential function charts. Geneva, Switzerland. Recuperado el 26/05/2026: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/19077/a0175aca9c504229beb0d6b01861b5d0/IEC-60848-2013.pdf>
- Julius, R., Schütz, C., & Vogel-Heuser, B., 2017. Transformation of GRAFCET to PLC code including hierarchical structures. Control Engineering Practice, 64, DOI: [10.1016/j.conengprac.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.04.011)
- Martínez Antona, P.; Ruano Ruano, I.; Sánchez García, A., 2026. Desarrollo de una aplicación gráfica para la generación de gemelos digitales de PLC basados en GRAFCET utilizando un protocolo de comunicación industrial. TFG, Universidad de Jaén. Recuperado el 26/05/2026: <https://hdl.handle.net/10953.1/29205>
- Modbus organization, 2006. MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b, Recuperado el 26/05/2026: <https://www.modbus.org/file/secure/messagingimplementationguide.pdf>
- OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Technical Committee, 2019. MQTT Version 5.0 Specification. Recuperado el 26/05/2026: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf>
- OPC Foundation, 2025. OPC UA Online Reference, Recuperado el 26/05/2026: <https://reference.opcfoundation.org/>
- Ortiz, J. S., et al., 2025. Digital Twin-Based Active Learning for Industrial Process Control and Supervision in Industry 4.0. Sensors, vol. 25, no. 7, p. 2076. DOI: [10.3390/s25072076](https://doi.org/10.3390/s25072076)
- Patera, L. et al., 2022. A Layered Middleware for OT/IT Convergence to Empower Industry 5.0 Applications. Sensors, 22(1), 190; DOI: [10.3390/s22010190](https://doi.org/10.3390/s22010190)
- Sharma, A. et al., 2022. Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions. Journal of Industrial Information Integration, Vol.30. ISSN 2452-414X, DOI: [10.1016/j.jii.2022.100383](https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383)
- Tao, F., et al., 2019. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415. DOI: [10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186)
- Vite. (s. f.). Vite | Next generation frontend tooling, Recuperado el 26/05/2026: <https://es.vite.dev/>
- Xyflow, 2021. React Flow, Recuperado el 26/05/2026: <https://reactflow.dev/>
- Zunino, C. et al., 2024. Adaptive Seamless Redundancy to Achieve Highly Dependable MQTT Communication. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 1, pp. 984-994, Jan. 2024, DOI: [10.1109/TII.2023.3271708](https://doi.org/10.1109/TII.2023.3271708).