



# Integración de IIoT en Smart Grid: Análisis de protocolos MQTT y CoAP en subestaciones digitales

## IoT Integration in Smart Grid: Analysis of MQTT and CoAP Protocols in Digital Substations

Yessica Monges<sup>1,2</sup>

<https://orcid.org/0009-0004-7190-7299>  
[yessica.monges@pti.org.py](mailto:yessica.monges@pti.org.py)

Enrique Flecha<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0009-0007-1612-2773>  
[enrique.flecha@pti.org.py](mailto:enrique.flecha@pti.org.py)

Enrique Chaparro<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-9868-7415>  
[enriquerchv@fpune.edu.py](mailto:enriquerchv@fpune.edu.py)

1. Universidad Nacional del Este, Paraguay, Ciudad del Este
2. Parque tecnológico de Itaipu, Paraguay, Hernandarias

### Resumen

Se propone una solución para integración de protocolos de comunicación de Smart Grid con el estándar IEC 61850 en subestaciones inteligentes y el estándar IIoT (Industrial Internet of Things). Estas tecnologías constituyen uno de los principales facilitadores para la cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0. Sin embargo, se sabe que la incorporación de nuevas tecnologías en el sector eléctrico, para sistemas de monitoreo y actuación por comandos digitales, son más lentas debido a los requerimientos de eficiencia y seguridad en la transmisión de datos. Entre los estándares IoT más relevantes se encuentran el Protocolo de Aplicación Restringida (CoAP) y el Protocolo de Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes (MQTT). Para evaluar la integración de estos protocolos en el sistema eléctrico, se utiliza una plataforma de prueba que permite la gestión de la información a través de servicios IEC 61850, combinados con mensajes MQTT/CoAP - IIoT. Se implementa una aplicación de monitoreo de gas SF<sub>6</sub> como caso de estudio. Además, esta plataforma de prueba facilita la evaluación de la interoperabilidad de sistemas aislados, ya que los protocolos de comunicación utilizados en las subestaciones a menudo no son compatibles entre sí. De este modo, se logra la integración de señales y datos de control y monitoreo en el sistema SCADA. Se ofrece resultados de pruebas y simulaciones del rendimiento de la integración en subestaciones digitales, mostrando la eficiencia de la propuesta.

**Palabras clave:** Smart Grid; IEC 61850; IIoT; Industria 4.0; subestación; interoperabilidad

### Abstract

A solution for the integration of Smart Grid communication protocols is proposed through an IEC 61850 - IIoT (Industrial Internet of Things) test bench. The IIoT is one of the main implementations for the fourth industrial revolution, known as Industry 4.0. However, it is known that the incorporation of new technologies in the electricity sector, for monitoring systems and actuation by digital commands, are slower due to the requirements of efficiency and security in data transmission. Some of the most relevant IoT standards are: Constrained Application Protocol (CoAP) and Message Queue Telemetry Transport (MQTT). The implemented test bench allows the management of information through IEC61850 services, with MQTT/COAP – IIoT messages, in an SF<sub>6</sub> gas monitoring application. Likewise, it provides interoperability evaluations of isolated systems that use non- interoperable communication protocols in the substation and, therefore, are not capable of integrating monitoring signals and data into the SCADA system. Communication performance test results for both protocols, MQTT y CoAP, in the implemented IIoT platform and integration performance comparisons for digital substations are presented, showing the efficiency of the proposal.

**Keywords:** Smart Grid, IEC 61850, IIoT, Industry 4.0, interoperability



## INTRODUCCIÓN

La introducción del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) ha sugerido un potencial de cambio significativo en el sector eléctrico, específicamente en los procesos de monitoreo, control y protección. Sin embargo, surgen una serie de desafíos que abarcan aspectos cruciales como la seguridad cibernética, la gestión de datos, adaptación de infraestructura, entre otros.

La adaptación de infraestructura de sistemas complejas ya existentes destaca la importancia del paradigma de interoperabilidad, es decir, la correcta integración de datos entre diversos protocolos de comunicación, que, en el ámbito de sistemas de protección, monitoreo y control, se rigen por normas o estándares establecidas que, actualmente, no son compatibles con los protocolos que caracterizan al mundo de los dispositivos IoT o las redes inalámbricas.

En las subestaciones eléctricas, la monitorización de la infraestructura en tiempo real es fundamental y se logra mediante la visualización de datos en los Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), así también, La necesidad de obtener informaciones de funcionamiento de los equipos de maniobra, transformadores y sistemas de alimentación es esencial para prever casos de fallas o planificar mantenimientos. La facilidad de asistencia es resultante de la adopción de normas o estándares para interoperabilidad de todos los elementos de la red.

La discrepancia entre estos protocolos establecidos y los utilizados en el ámbito del IIoT se presenta como el principal desafío para la expansión efectiva de esta tecnología en el sector. En consecuencia, es de vital importancia buscar soluciones efectivas que posibiliten la integración de sistemas, otorgando especial prioridad a la interoperabilidad entre protocolos provenientes de diversas tecnologías y fabricantes. Es aquí donde, aprovechando el potencial de redes inteligentes IIoT para lograr una arquitectura de comunicación flexible, logra la integración de datos entre los procesos eléctricos y otras aplicaciones para la automatización de sistemas como análisis de datos y mejoras en el rendimiento de los procesos.

La norma IEC 61850 es un estándar para la automatización de subestaciones eléctricas que del protocolo de comunicación y la transmisión de información en tiempo real (*International Electrotechnical Commission* [IEC], 2011, p. 17). Los protocolos que componen la norma incluyen servicios de comunicación como la transferencia rápida de eventos GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) y los *Sampled Values*, así como los mensajes de usuario y eventos de transferencia lenta MMS (*Manufacturing Message Specification*) (IEC, 2011, p. 19; Monges et al., 2022). La norma IEC 61850 sugiere de la necesidad de unificación de protocolos, tanto estandarizados (IEC 60870-5-101 y 104, Modbus, DNP, etc.), como los protocolos propietarios, con el fin de conseguir interoperabilidad entre fabricantes, sin embargo, entre estos protocolos no están integrados IoT.

En las aplicaciones IoT, los protocolos más utilizados se clasifican en *Constrained Application Protocol* (CoAP) y *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) debido a su aplicabilidad en la creación de una arquitectura de comunicación para la transmisión de datos. En este contexto, la interoperabilidad debe validarse mediante escenarios de prueba, evaluando el desempeño conjunto de los protocolos de comunicación, considerando la norma IEC 61850 en subestaciones inteligentes y protocolos de IoT de diferentes fabricantes (Gil et al., 2022; Ji et al., 2021).



El protocolo MQTT es una extensión ligera de TCP/IP que utiliza un modelo de publicación-suscripción. Esto implica que un cliente MQTT puede publicar un mensaje destinado a un servidor MQTT que luego será reenviado por el servidor a todos los clientes MQTT que están suscritos a una información dada (Gil et al., 2022). Por otro lado, COAP utiliza el modelo cliente-servidor basado en el protocolo HTTP, pero está diseñado para ser más ligero y eficiente para aplicaciones IoT y dispositivos con recursos limitados.

Para describir el desempeño de ambas técnicas de gestión y manipulación de datos en subestaciones digitales y describir la plataforma de pruebas implementadas utilizando aplicaciones IIoT para la evaluación de interoperabilidad, se presenta un caso de estudio específico, como la evaluación del desempeño de un dispositivo basado en la norma IEC 61850 también denominado IED (Dispositivo electrónico inteligente) que realiza el monitoreo de gas SF<sub>6</sub> en un interruptor de potencia instalado en el laboratorio del Parque Tecnológico de Itaipu (PTI Py) (Monges et al., 2022).

## MÉTODOS Y MATERIALES

En este estudio se empleó una metodología empírica de estudio de caso para comprender a fondo el fenómeno de integración de protocolos en subestaciones convencionales y IOT. Esto se debe principalmente a la escasa disponibilidad de investigaciones exhaustivas y específicas que aborden de manera integral los desafíos y oportunidades asociados con la convergencia de protocolos en estos entornos.

Además, la factibilidad técnica para implementaciones en campo, dentro del Parque tecnológico de Itaipu

### Recursos utilizados:

- Módulo de medición: Sensores o dispositivos para medición analógica y en el caso de estudio mediciones de gas convencional SF<sub>6</sub>. Interruptor de potencia de 220kV de una subestación a gas SF<sub>6</sub> del Parque Tecnológico de Itaipu (PTI Py), instalado en el laboratorio del PTI Py. Son los sensores del gas SF<sub>6</sub> de los interruptores de potencia. Se realiza el monitoreo periódico de las variables (Temperatura, presión y humedad), así como de la condición del estado de desempeño y del rendimiento del referido equipamiento, para el mantenimiento programado que se muestra en la Fig. 1 instalado en campo.
- La Unidad de procesamiento (*Mapping protocol*) es el elemento del sistema que realiza la conversiones o mapeo de protocolos y transmite los datos en MQTT/COAP para su posterior traducción a la norma IEC61850.

### Metodología:

- Configuración del entorno de prueba: Se configura el IED del interruptor de potencia de 220kV en el laboratorio del PTI Py.
- Pruebas de comparación entre protocolos: Se llevaron a cabo una serie de experimentos en un entorno controlado. Cada experimento consistió en enviar 250 solicitudes de CoAP GET y solicitudes de suscripción para MQTT. Durante los experimentos, se monitorizó el tráfico de red utilizando el analizador de red Wireshark.

- Medición y análisis de rendimiento: Se obtuvieron datos relacionados con el ancho de banda, la latencia, el *jitter* y la pérdida de paquetes para cada protocolo. Estos datos se utilizaron para evaluar el rendimiento de los protocolos MQTT y CoAP en la integración con el sistema de subestación digital.
- Análisis de resultados: Se compararon los resultados de rendimiento obtenidos para ambos protocolos:
- Pruebas de rendimiento: Las pruebas de rendimiento determinan la capacidad para la gestión de grandes cantidades de datos y control de los eventos de la red eléctrica de manera oportuna y eficiente. Estas pruebas se centran en aspectos como la velocidad de transmisión de datos, la latencia, la capacidad de procesamiento y la escalabilidad del sistema.

**Figura 1**

Interruptor de potencia de 220kV del caso de estudio. El cual es realizado el monitoreo de SF6.



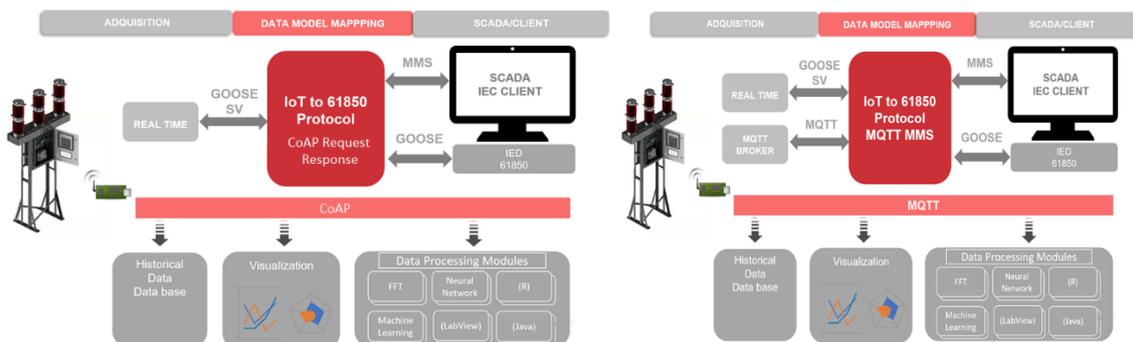
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La solución propuesta, en el presente trabajo, tiene como objetivo permitir que los dispositivos y aplicaciones IoT, en el dominio MQTT/COAP, accedan a los datos e invoquen los servicios disponibles en el dominio IEC 61850 de subestaciones digitales que sirven como base de determinar el desempeño en entorno reales y sus limitaciones.

Para mapear la representación digital de cada recurso eléctrico IEC 61850 en otra representación digital compatible con el estándar de IoT, en la Fig. 2 se representa esquemáticamente a la arquitectura de comunicación para el caso de MQTT/COAP en la plataforma de pruebas implementada.

**Figura 2**

Arquitectura de la plataforma IoT- IEC 61850. Se muestran los procesos de conversión y etapas principales utilizando los protocolos MQTT y COAP – IoT y IEC 61850: GOOSE, SV y MMS.



La arquitectura que describe el *Gateway* IoT-IEC 61850, descrito en la Fig. 2 está conformada por las siguientes etapas:

- Módulo de medición: Sensores o dispositivos para medición analógica y en el caso de estudio mediciones de gas SF<sub>6</sub> de los interruptores de potencia convencional;
- Unidad de procesamiento: Elemento más crítico del sistema que realiza las conversiones o mapeo de protocolo IEC 61850 con CoAP o MQTT y transmite los datos. Contiene los requerimientos en tiempo real;
- Sistema de monitoreo y reclutamiento de datos IEC 61850 donde se configuran los datos mediante SCL.

En el caso de MQTT el Servidor/Suscriptor forma parte del dispositivo *Gateway* IEC 61850 y se encarga de la gestión del modelo de datos IEC 61850 y sus clases asociados, que muestran las variables reales del sistema y actualiza el modelo de datos bajo el estándar IEC 61850 así como la gestión de los comandos enviados vía SV/GOOSE y se mapea a comando MQTT IoT.

Para los servicios del protocolo CoAP se basan en UDP en la capa de transporte lo que implica realizar una capa de mapeo entre datos CoAP y IEC 61850. Este mapeo se realiza entre el modelo de datos IEC 61850 para enviarlos mediante un URI CoAP. Del protocolo CoAP se extrae el tipo de solicitud IEC 61850 según la naturaleza del mensaje recibido y se asigna el tipo de solicitud del modelo de datos IEC 61850 y el método CoAP.

El cliente IEC 61850 recibe el mensaje y responde con un mensaje que contiene los valores de respuesta para la puerta de enlace basada en protocolos IoT.

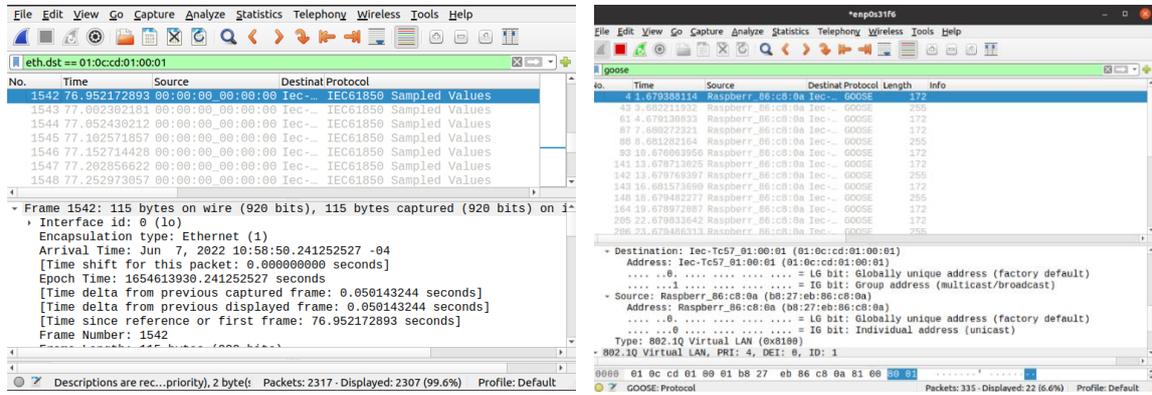
Se observan también que la adquisición de datos de sensores se aplican los formatos del protocolo de comunicación proveniente del equipo basado en la norma IEC 61850 SV o GOOSE y se envían directamente a la estación de control mediante mensajes MMS. El formato de comunicación GOOSE tiene como objetivo transmitir rápidamente la información del evento a múltiples dispositivos, asegurando la llegada de la información intercambiada por repetición al suscriptor, a través de internet/intranet. En cuanto a *Sampled Value*, necesita transmitir señales de campo analógicas, como corriente, voltaje o cualquiera de sus derivados, mediante comunicaciones digitales. Las señales analógicas se muestrean y transmiten. Tanto los servicios GOOSE como SV están encapsulados en Ethernet OSI de capa 2.



El modelo de comunicación funciona incluso en caso de cambio de valor de algún elemento del conjunto de datos (agrupación de datos diferentes en un mismo conjunto) y se envía en formato GOOSE o SV.

**Figura 3**

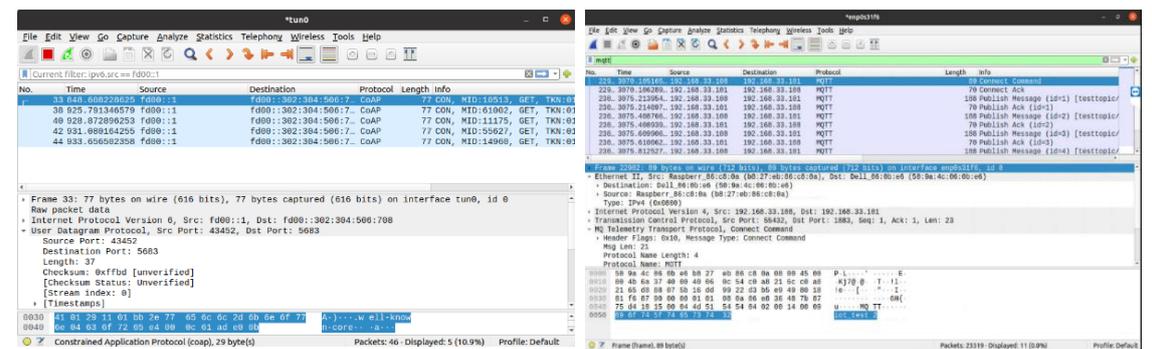
Datos recibidos usando IEC 61850 para SV/GOOSE enviados por el sensor conectado al sistema de monitoreo de gas SF6 analizado por Wireshark para la segunda arquitectura propuesta.



Un punto por considerar es que TCP (MQTT) es un protocolo orientado a conexión garantiza que aplicaciones que requieren una transferencia de datos sean confiable y precisa, como la transferencia de grandes cantidades de datos o el control de dispositivos críticos en la red eléctrica inteligente. Mientras que UDP (CoAP) es un protocolo sin conexión que no garantiza la entrega de los paquetes en orden o sin errores, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones que requieren una alta velocidad de transferencia de datos, como la transmisión de datos en tiempo real.

**Figura 4**

Arquitectura de la plataforma IoT- IEC 61850. Captura de un paquete MQTT/CoAP encryptado de los datos enviados por el sensor de SF6.



Cada experimento consistió en el envío de 250 solicitudes CoAP GET por parte del cliente para obtener el valor procedente del IED y solicitudes de suscripción para MQTT y cada experimento fue monitoreado usando el analizador de red Wireshark (Fig. 4).

Posteriormente, de la captura de Wireshark entrega información sobre el total de bytes transmitidos por cada mensaje y la diferencia de tiempo entre la solicitud y la respuesta. Esta información se utilizará como estimación del ancho de banda y la latencia de los diversos modos del protocolo utilizando otras herramientas de análisis como IPERF



(herramienta de prueba de red que permite crear flujos de datos TCP y UDP, y medir el rendimiento de una red que los transporte.

La métrica sobre el desempeño o pruebas de rendimiento, determinan la capacidad para la gestión de grandes cantidades de datos y control de los eventos del IED, a continuación, se describe el conjunto de pruebas del que realizan una.

- Pruebas de ancho de banda: miden la velocidad de transferencia de datos entre dos puntos de la red.
- Pruebas de latencia: miden el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde un punto de la red a otro.
- Pruebas de *jitter*: miden la variabilidad en la latencia de los paquetes de datos.
- Pruebas de pérdida de paquetes: miden la cantidad de paquetes de datos que se pierden durante la transmisión.
- Pruebas de carga: miden la capacidad de la red para manejar una carga determinada de tráfico de datos.

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las pruebas realizadas dentro de un entorno controlado. El tiempo de retardo entre el primero y el último paquete intercambiado para cada transferencia se midió durante los experimentos para evaluar la latencia ofrecida. Es importante remarcar que estos retardos de tiempo incluyen el tiempo requerido desde la adquisición de datos del sensor SF6, su transmisión en IEC61850. En términos de latencia, CoAP presenta una latencia promedio de 35,85 milisegundos, mientras que MQTT tiene una latencia promedio de 28,34 milisegundos, indicando un retardo más bajo.

**Tabla 1**

Pruebas realizadas de desempeño de integración del protocolo IoTT (MQTT y CoAP) en IED basado en la norma IEC 61850

Pruebas	Desempeño				
	Latencia promedio (mseg)	Jitter (mseg)	Bandwidth Mbits/sec	Loss Frame	Throughput Mbits/sec
Protocolo					
CoAP	35,85	7,5	42.8	30.1	885 bytes/ 0%
MQTT	28,34	2,45	26.9	19.2	850 bytes %0
Total	878	751	877	717	

Nota. Esta tabla demuestra comparativa de desempeño en la integración del protocolo IoTT (MQTT y CoAP) en aplicaciones Smart grid de IED basado en la norma IEC 61850. Se realizan 250 muestras por test por cada protocolo.

En cuanto al *jitter*, CoAP tiene un *jitter* de 7,5 milisegundos, mientras que MQTT tiene un *jitter* de 2,45 milisegundos mucho menor, está asociado a requerimientos de una transmisión de datos en tiempo real y una alta calidad de servicio (QoS).

En cuanto al ancho de banda CoAP tiene una mayor capacidad de ancho de banda al igual que tasa de transferencia, teniendo en cuenta que la máxima longitud del mensaje es de 885 bytes (Mensajería MMS) sin pérdida de trama.

Estos resultados pueden depender de la aplicación y del entorno específico en el que se utilizan estos protocolos, CoAP tiene un ancho de banda mayor y un mejor



rendimiento que MQTT, pero MQTT tiene una menor latencia y *jitter*. Además, ambas una longitud de trama similar y no hay pérdida de trama en ninguna de las dos.

La plataforma de pruebas propuesta es capaz de integrar las directivas del protocolo de comunicación IEC 61850 con protocolos diferentes de IoT, usando MQTT y CoAP, y aplicados al caso práctico de monitoreo de gas SF<sub>6</sub> en un tablero exterior. Entonces, con la inclusión de las directivas del IEC 61850 se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Comunicación óptima entre la central y la adquisición de datos;
- b) Capacidad ampliada del sistema facilitando la inclusión a la nube con aplicaciones de Big Data, Edge Computing, y herramientas computacionales para predicción;
- c) Visualización en SCADA de las magnitudes físicas y eléctricas monitoreadas;
- d) Compatibilización con otros dispositivos basados en IEC 61850 y protocolos MQTT y CoAP.

Mediante las evaluaciones de ambos protocolos IoT, revelaron que CoAP tiene una tasa de pérdida de paquetes más alta que MQTT, lo que significa que puede ser menos confiable en algunos casos. Además, para longitudes de mensajes pequeñas y tasas de pérdida iguales o inferiores al CoAP genera un tráfico adicional menor que MQTT para garantizar la confiabilidad. En este aspecto para diferentes paquetes recibidos de IEC 61850 donde aumenta el tamaño del mensaje que se envía, CoAP maneja más datos que MQTT. La capacidad de cada protocolo depende de muchos otros factores, como la calidad de la conexión de red, la carga de red, la cantidad de dispositivos conectados, entre otros.

Con el banco de pruebas, implementado en el laboratorio del PTI Py, se mostró, a partir de los resultados de simulación que cualquiera de los protocolos utilizados, puede ser ejecutado en un entorno integrado, sin un impacto significativo en el rendimiento, ya que en ambos casos se obtuvieron tiempos de finalización bajos, en todos los escenarios probados, lo cual es un aspecto relevante para su aplicación en entornos críticos.

Como trabajo futuro se propone la mejora de la integración de la seguridad, es decir, aunque MQTT y CoAP implementan métodos de seguridad de la capa de transporte para garantizar transmisiones de datos seguras y la verificación de la integridad de clientes y servidores, aún hay margen para mejorar la integración de la seguridad.

Así también, se prevé la integración de los sistemas eléctricos actualmente en operación, junto con la infraestructura de equipos y software ya instalados, a través de una solución Gateway, para integrarlos con los actuales sistemas inteligentes en desarrollo en el PTI.

## REFERENCIAS

- Gil, S., Zapata-Madrigal, G. D., García-Sierra, R., et al. (2022). Converging IoT protocols for the data integration of automation systems in the electrical industry. *Journal of Electrical Systems and Inf Technol*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s43067-022-00043-4>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2011). *Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-1: Basic communication structure – Principles and models* (2nd ed., vol. 2011). <https://webstore.iec.ch/publication/6014>



- Ji, Z., Zhang, T., Chen, K., Chen, J., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). Ubiquitous Sensing Intelligent Gateway for Power IoT based on IEC61850 Standard. In Proceedings of the 33rd Chinese Control Decision Conference – CCDC 2021 (pp. 5625-5628). doi: <https://10.1109/CCDC52312.2021.9602324>
- Monges, Y., Cabañas, J., Lopez, M., Morel, S., & Chaparro, E. (2022). An integrated testbed IEC61850-IIoT for Gas Insulated SF6 Monitoring in SCADA systems. In 2022 IEEE ANDESCON (pp. 1-6). Barranquilla, Colombia. doi: [10.1109/ANDESCON56260.2022.9989721](https://10.1109/ANDESCON56260.2022.9989721)