

DEL DATO DE TELEMETRÍA AL ENERGY TWIN: METODOLOGÍA OT-EDGE Y CONTEXTUALIZACIÓN SEMÁNTICA PARA REDUCIR COSTES EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

Valter Cartella

Consultor independiente en IT/OT Security y Digitalización Industrial — España

RESUMEN

La industria cerámica se caracteriza por procesos de alta intensidad energética, en los que hornos, secaderos, compresores, líneas de producción y sistemas auxiliares inciden de forma significativa en los costes operativos, la competitividad y los objetivos de descarbonización. Sin embargo, en muchos entornos industriales, la telemetría energética sigue tratándose como un conjunto de curvas de consumo separadas del contexto operativo real de la fábrica. El resultado es, con frecuencia, un “cementerio de datos”: grandes volúmenes de medidas disponibles, pero difíciles de transformar en decisiones, prioridades de intervención y acciones de ahorro.

Esta comunicación propone una metodología OT-Edge ligera para evolucionar desde la monitorización energética tradicional hacia un Energy Twin aplicable a la industria cerámica. La metodología se basa en la adquisición de datos energéticos y operativos a nivel edge, su transmisión mediante un broker MQTT, la fusión y contextualización semántica mediante lógica de procesamiento edge, y su almacenamiento en una base de datos time-series para la generación de KPI, análisis y conocimiento operativo.

El elemento distintivo de la propuesta es la contextualización semántica del dato energético. El consumo no se analiza como un valor aislado, sino asociado a activo, línea, área, estado de máquina, calidad del dato y, cuando sea necesario, a una entrada ligera del operador mediante tablet o interfaz HMI simplificada. Esto permite correlacionar el consumo energético con estados como producción normal, setup, cambio de formato, avería, mantenimiento o espera, haciendo posible calcular consumos improductivos, pérdidas energéticas, anomalías y prioridades de optimización.

La metodología se plantea como una PoC OT-Edge de 6-8 semanas, no invasiva y de bajo riesgo, orientada a validar rápidamente si los datos energéticos contextualizados pueden generar valor operativo antes de escalar hacia un Energy Twin más completo. La propuesta está respaldada por una demo técnica end-to-end ya validada en entorno de laboratorio, basada en un activo industrial simulado, telemetría JSON, MQTT, Node-RED, InfluxDB y Grafana.

La principal contribución consiste en proponer un recorrido pragmático desde el dato de telemetría hasta el Energy Twin: no un Digital Twin completo e inmediato, sino una base de datos industrial contextualizada, útil para reducir costes, identificar oportunidades de ahorro y preparar futuras iniciativas de digitalización avanzada.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector cerámico, la energía no es solo un coste operativo: es una variable estratégica que condiciona competitividad, calidad, eficiencia y descarbonización. Procesos como cocción, secado, prensado, esmaltado, movimiento interno, compresión de aire y embalaje requieren cantidades significativas de energía y contribuyen directamente a los costes operativos de la empresa.

En este contexto, la digitalización industrial no puede considerarse únicamente una tendencia tecnológica. Debe convertirse en una herramienta práctica para comprender mejor el proceso productivo, reducir pérdidas, mejorar la calidad de las decisiones y aumentar la competitividad. El dato, si se adquiere, contextualiza y utiliza correctamente, puede convertirse en una ventaja competitiva real.

Sin embargo, en la práctica industrial existe con frecuencia una distancia entre la disponibilidad del dato y su utilización efectiva. Muchas empresas disponen de telemetría, medidas energéticas, históricos de producción, eventos de máquina y alarmas, pero estos datos permanecen a menudo aislados, no normalizados o difíciles de correlacionar. Como consecuencia, la monitorización energética corre el riesgo de limitarse a la visualización de curvas de consumo, sin generar automáticamente conocimiento operativo.

Esta comunicación propone una metodología OT-Edge para reducir esa distancia. El objetivo es transformar la telemetría energética bruta en dato industrial contextualizado, asociando el consumo energético al contexto operativo real: activo, línea, área, estado de máquina, fase de proceso, calidad del dato y, cuando sea necesario, entrada del operador.

El resultado esperado no es la construcción inmediata de un Digital Twin completo, sino la realización de un primer nivel de Energy Twin: una representación energético-operativa de la instalación capaz de soportar análisis, KPI, identificación de pérdidas y prioridades de intervención.

2. EL PROBLEMA: EL CEMENTERIO DE LOS DATOS ENERGÉTICOS

En muchas fábricas, el problema ya no es únicamente la ausencia de datos. A menudo, el problema es la dificultad para transformar los datos disponibles en decisiones útiles. Hornos, secaderos, compresores, líneas de producción y sistemas auxiliares pueden generar grandes volúmenes de telemetría, pero dicha telemetría no siempre se vincula al contexto operativo que determina su significado.

Un valor de consumo energético, considerado de forma aislada, proporciona información limitada. Saber que un activo está consumiendo 120 kW puede ser útil, pero no es suficiente para comprender si ese consumo es productivo, improductivo, anómalo o evitable. El mismo valor adquiere significados muy diferentes si está asociado a producción normal, setup, cambio de formato, espera de material, mantenimiento, avería o stand-by.

La monitorización energética tradicional permite observar el consumo, pero no siempre permite interpretarlo. Un cuadro de mando puede mostrar la evolución de la potencia o de la energía consumida, pero sin contexto operativo es difícil responder a preguntas esenciales:

- ¿cuánta energía se consume durante la producción normal?
- ¿cuánta energía se consume durante setup y cambios de formato?
- ¿qué activos consumen energía incluso cuando no producen?
- ¿qué paradas generan consumos improductivos?
- ¿qué anomalías energéticas se repiten en el tiempo?
- ¿qué intervenciones deberían tener prioridad económica?

Este fenómeno puede definirse como un “cementerio de datos”: datos disponibles, pero insuficientemente valorizados. La propuesta presentada nace precisamente de esta criticidad: medir energía no significa todavía comprenderla.

3. DE LA MONITORIZACIÓN ENERGÉTICA AL ENERGY TWIN

El paso de la monitorización energética al Energy Twin requiere un salto conceptual. No se trata únicamente de recopilar más datos o de visualizarlos mediante cuadros de mando más sofisticados. Se trata de construir una representación coherente del comportamiento energético-operativo de la instalación.

Desde esta perspectiva, la monitorización energética representa el primer nivel: observar cuánto se consume. El siguiente nivel es la inteligencia energético-operativa: comprender en qué contexto se produce ese consumo. El Energy Twin representa un paso adicional: una base de datos y analítica capaz de describir el comportamiento energético de activos, líneas y procesos en el tiempo, vinculando consumo, estado operativo, condiciones productivas y oportunidades de mejora.

El Energy Twin no debe confundirse con un Digital Twin industrial completo. Un Digital Twin maduro puede incluir modelos físicos, simulaciones complejas, mantenimiento predictivo, calidad, producción, logística y optimización multivariable. El Energy Twin, en cambio, puede entenderse como un primer nivel pragmático y focalizado: un gemelo energético-operativo orientado a comprender cómo, cuándo, dónde y por qué se consume la energía.

Este enfoque resulta especialmente adecuado para la industria cerámica, donde el peso del consumo energético es elevado y donde una mejor comprensión de la relación entre energía, proceso y contexto operativo puede producir beneficios concretos.

4. METODOLOGÍA OT-EDGE PROPUESTA

La metodología propuesta se basa en una arquitectura OT-Edge ligera, diseñada para implementarse inicialmente sobre un activo o una línea piloto, sin requerir una transformación completa de la fábrica.

El principio es sencillo: adquirir datos cerca del proceso, contextualizarlos a nivel edge, almacenarlos de forma coherente y transformarlos en KPI útiles para la toma de decisiones.

Las fases principales de la metodología son:

1. seleccionar un activo o una línea de alto impacto energético;
2. identificar los datos disponibles desde PLC, contadores, SCADA, MES u otros sistemas;
3. adquirir la telemetría energética y operativa a nivel edge;
4. publicar los datos mediante un broker MQTT;
5. adquirir, si es necesario, entrada semántica del operador mediante tablet o HMI ligera;
6. normalizar y fusionar los datos a nivel edge;
7. almacenar el dato enriquecido en una base de datos time-series;
8. calcular KPI energético-operativos;
9. identificar pérdidas, anomalías y consumos improductivos;
10. definir una hoja de ruta hacia Energy Twin y Digital Twin industrial.

La arquitectura propuesta está concebida como pasiva y no invasiva. El objetivo no es interferir con el control de proceso, sino observar, adquirir, correlacionar y analizar. Este aspecto es especialmente importante en entornos industriales donde la seguridad, la continuidad productiva y la fiabilidad operativa son prioritarias.

5. CONTEXTUALIZACIÓN SEMÁNTICA: EL ELEMENTO DIFERENCIADOR

El elemento central de la metodología es la contextualización semántica. El dato energético no se considera un valor aislado, sino parte de un evento industrial más amplio.

Un dato energético contextualizado puede incluir:

- timestamp;
- planta;
- área;
- línea;
- activo;
- tipo de activo;
- estado de máquina;
- contexto del operador;
- potencia;
- energía acumulada;
- corriente;
- tensión;
- calidad del dato;
- fuente del dato.

La diferencia entre dato bruto y dato contextualizado es sustancial. Un valor como "120 kW" indica únicamente una medida. Una información como "horno_01, línea_01, producción normal, 120 kW, calidad del dato buena, timestamp preciso" permite atribuir el consumo a una condición operativa específica.

Esta lógica permite responder a preguntas mucho más útiles:

- ¿cuánto cuesta energéticamente un cambio de formato?
- ¿cuánto consumo se produce durante estados de espera?
- ¿qué activos consumen energía de forma anómala respecto a su estado?
- ¿qué fases operativas generan pérdidas recurrentes?
- ¿qué intervenciones pueden generar ahorro más rápidamente?

La semántica, en este contexto, no es un concepto abstracto. Es la conexión entre el dato técnico y la realidad operativa.

6. ENTRADA SEMÁNTICA DEL OPERADOR

Un aspecto distintivo de la propuesta es la posibilidad de integrar una entrada ligera del operador. En muchas instalaciones industriales, no todos los estados operativos están disponibles de forma automática, fiable o suficientemente granular. Parte de la información permanece en el conocimiento práctico de los operadores o se registra de manera no estructurada.

Por este motivo, la metodología contempla el uso de un tablet, smartphone o interfaz HMI sencilla como capa de entrada semántica del operador. La interfaz puede presentar pocos estados operativos claros, por ejemplo:

- producción normal;
- setup / cambio de formato;
- avería;
- mantenimiento;
- espera / stand-by;
- otro, con nota textual.

Cuando el operador selecciona un estado, se genera un evento con timestamp que puede publicarse mediante MQTT. Este evento se fusiona posteriormente con la telemetría energética a nivel edge.

El objetivo no es sustituir PLC, SCADA o MES. Al contrario, la entrada del operador representa un mecanismo complementario, especialmente útil en fases iniciales de PoC, en instalaciones legacy o en contextos donde el dato operativo todavía no está completamente disponible.

Este mecanismo permite transformar rápidamente una simple medida energética en un dato enriquecido. Por ejemplo, el sistema no registra únicamente que un compresor consume 12 kW,

sino que esos 12 kW están asociados a un estado de setup, stand-by, mantenimiento o producción normal.

7. ARQUITECTURA DE REFERENCIA DE LA DEMO STATION

La metodología ha sido validada mediante una Demo Station OT-Edge en entorno de laboratorio. La Demo Station no representa un producto final ni una solución vinculada a un proveedor específico, sino un laboratorio técnico para demostrar la viabilidad del método.

La cadena validada está compuesta por:

- un activo industrial simulado mediante publisher Python;
- telemetría JSON;
- broker MQTT Mosquitto;
- Node-RED para recepción, transformación y fusión de datos;
- InfluxDB para almacenamiento time-series;
- Grafana para visualización de KPI y cuadros de mando.

El activo simulado genera telemetría relativa a un compresor industrial, incluyendo campos como potencia, energía, corriente, tensión, estado de máquina, activo, línea, área, calidad del dato y fuente.

La figura arquitectónica de la metodología muestra dos flujos distintos que convergen en el mismo broker MQTT:

1. el flujo de telemetría energética y operativa procedente de activos, PLC, contadores o simuladores;
2. el flujo de contexto operativo procedente de tablet o interfaz de operador.

Aguas abajo del broker MQTT, Node-RED desempeña el papel de nivel de fusión y contextualización semántica. Los datos enriquecidos se almacenan posteriormente en InfluxDB y se utilizan para calcular KPI y conocimiento energético-operativo.

Arquitectura OT-Edge para contextualización semántica y Energy Twin

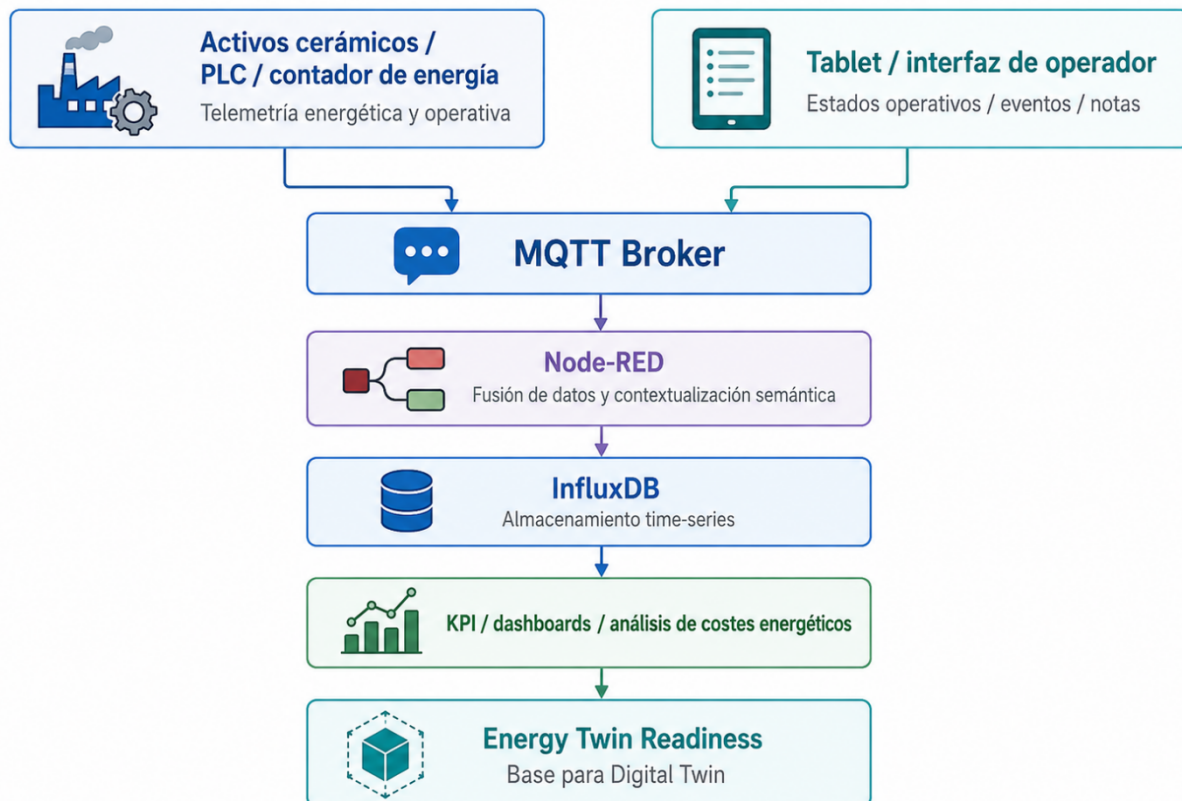


Figura 1. Arquitectura de referencia de la metodología propuesta. Dos flujos distintos, la telemetría energética y operativa procedente de los activos industriales y el contexto operativo introducido por el operador mediante una interfaz ligera, convergen en el broker MQTT. Aguas abajo, Node-RED ejecuta la fusión y contextualización semántica de los datos, que posteriormente se almacenan en InfluxDB y se utilizan para generar KPI, análisis de costes energéticos y una base de datos orientada al Energy Twin.

8. KPI Y OPORTUNIDADES DE REDUCCIÓN DE COSTES

El valor de la metodología emerge en la fase de análisis. Una vez contextualizado el dato energético, es posible calcular KPI más útiles que la simple visualización del consumo.

Ejemplos de KPI energético-operativos incluyen:

- consumo por estado operativo;
- energía consumida en producción normal;
- energía consumida durante setup y cambio de formato;
- energía consumida en stand-by o espera;
- idle energy loss;
- energy waste index;
- kWh por unidad producida;

- consumo anómalo por activo;
- comparación entre líneas o turnos;
- coste energético por fase operativa;
- prioridad económica de intervención.

El punto fundamental es que el ahorro nace de la capacidad de atribuir el consumo a la condición operativa correcta. Saber que una línea consume una determinada cantidad de energía es útil. Saber cuánta de esa energía se ha consumido en producción, setup, espera o avería es mucho más útil.

Esta capacidad permite distinguir entre consumo productivo y consumo improductivo, identificando oportunidades de optimización que de otra forma permanecerían ocultas.

En contextos como el español, la disponibilidad de datos energéticos fiables, historizados y contextualizados puede además facilitar la evaluación técnica de intervenciones de eficiencia y su eventual integración con mecanismos regulados de valorización del ahorro energético, cuando sean aplicables. Este aspecto no constituye el objetivo principal de la metodología, pero puede representar un beneficio colateral cuando los datos recogidos permiten documentar de forma más sólida las actuaciones de mejora.

9. PROCEDIMIENTO POC: 6–8 SEMANAS PARA VALIDAR EL VALOR

La metodología propuesta puede aplicarse mediante una PoC ligera y transferible, diseñada para reducir complejidad, riesgo y tiempos de validación.

El objetivo de la PoC no es digitalizar toda la fábrica, sino demostrar rápidamente si los datos energéticos contextualizados pueden generar decisiones operativas y oportunidades reales de ahorro.

Un posible procedimiento de implementación incluye las siguientes fases:

1. selección de un activo o línea piloto;
2. análisis preliminar de los datos disponibles;
3. definición de una taxonomía mínima de estados operativos;
4. instalación temporal de la arquitectura OT–Edge;
5. adquisición de telemetría energética y operativa;
6. adquisición del contexto operativo automático o manual;
7. fusión semántica a nivel edge;
8. almacenamiento time-series;
9. cálculo de KPI;
10. análisis de oportunidades de ahorro;
11. informe final y hoja de ruta de extensión.

La **duración indicativa de la PoC es de 6–8 semanas**. Este periodo es suficiente para recopilar datos representativos, observar distintos estados operativos, validar la calidad de la telemetría, calcular KPI preliminares e identificar posibles oportunidades de optimización.

La siguiente tabla sintetiza una posible hoja de ruta progresiva:

Fase	Duración indicativa	Objetivo	Riesgo
PoC OT–Edge sobre activo o línea piloto	6–8 semanas	Validar adquisición de datos, semántica y KPI	Bajo
Extensión a línea o proceso	2–3 meses	Correlacionar energía, estados operativos y producción	Medio-bajo
Energy Twin operativo	3–6 meses	Modelar el comportamiento energético-operativo	Medio
Digital Twin industrial	Fase posterior	Integrar proceso, calidad, mantenimiento y simulación	Más alto

Esta hoja de ruta evita un error frecuente en los proyectos de digitalización industrial: comenzar con iniciativas demasiado amplias, costosas o difíciles de validar. Por el contrario, la metodología propone un recorrido incremental: empezar pequeño, validar el valor, medir el beneficio y solo después escalar.

10. APLICABILIDAD A LA INDUSTRIA CERÁMICA

La metodología resulta especialmente adecuada para el sector cerámico porque puede aplicarse progresivamente a distintos activos y procesos. Esto resulta especialmente relevante para el distrito cerámico de Castellón, donde la competitividad industrial depende cada vez más de optimizar el uso de la energía en hornos, secaderos, líneas de producción y sistemas auxiliares.

Ejemplos de aplicación incluyen:

- hornos;
- secaderos;
- compresores;
- líneas de prensado;
- líneas de esmaltado;
- líneas de decoración;
- movimiento interno y logística interna;
- embalaje;
- sistemas auxiliares.

En cada uno de estos contextos, el consumo energético puede analizarse en relación con estados operativos, fases de proceso, formatos, lotes, calidad, mantenimiento y condiciones productivas.

Un ejemplo concreto es el cambio de formato. Durante un cambio de formato, una línea puede seguir consumiendo energía aunque no esté produciendo valor directamente. Sin contextualización, dicho consumo puede aparecer como parte normal de la curva energética. Con contextualización semántica, en cambio, es posible cuantificar el coste energético del cambio de formato, compararlo entre turnos o líneas e identificar oportunidades de reducción.

Otro ejemplo se refiere a compresores y sistemas auxiliares. En muchas instalaciones, estos activos siguen consumiendo energía incluso en condiciones de baja productividad, stand-by o ineficiencia. Vincular el consumo al estado operativo permite evidenciar pérdidas recurrentes y definir prioridades de intervención.

11. SEGURIDAD, NO INVASIVIDAD Y GOBERNANZA DEL DATO

En entorno industrial, toda propuesta de digitalización debe considerar seguridad, continuidad operativa y gobernanza del dato. Por este motivo, la metodología propuesta adopta un enfoque no invasivo, orientado a la observación y el análisis, sin interferir con el control de proceso.

La PoC OT-Edge está concebida como una arquitectura local y controlada, conectada a los activos industriales en modo solo lectura, cuando sea técnicamente posible, y diseñada para adquirir telemetría energética y operativa sin enviar comandos hacia PLC, controladores o sistemas de automatización. El objetivo es observar el comportamiento energético-operativo de la instalación, no modificar su funcionamiento.

Desde el punto de vista de la segmentación, la solución puede implementarse como una pequeña red interna dedicada, aislada o prácticamente aislada respecto a la red de control existente. En esta configuración, el broker MQTT, la lógica de procesamiento edge, la base de datos time-series y los cuadros de mando permanecen dentro de un perímetro local controlado, accesible únicamente por personal autorizado, como el consultor, el operador o el responsable técnico encargado de la PoC.

Este modelo reduce la superficie de exposición y hace que la Demo Station sea compatible con un enfoque prudente de seguridad industrial. La solución no requiere conexión cloud obligatoria, no introduce lógicas de control remoto sobre los activos industriales y puede gestionarse como un entorno temporal de análisis, separado de los sistemas críticos de automatización.

En términos de Purdue Model, la arquitectura debe respetar la zona industrial en la que se aloja, sin crear rutas no gobernadas hacia niveles superiores o inferiores. La integración con PLC, SCADA, MES, plataformas cloud o sistemas empresariales puede evaluarse solo en fases posteriores, mediante reglas de segmentación, control de accesos, gestión de identidades, logging y gobernanza del dato coherentes con las políticas de ciberseguridad industrial de la empresa.

La metodología no impone una arquitectura final específica, sino que propone un modelo inicial replicable, seguro por diseño prudente y adecuado para una validación rápida. En fases posteriores, la misma lógica puede integrarse con SCADA, MES, sistemas de calidad,

mantenimiento, plataformas cloud, data lake o herramientas de IA, en función de la madurez digital y los requisitos de seguridad de la empresa.

12. CONCLUSIONES

La propuesta presentada introduce una metodología OT-Edge para transformar la telemetría energética en conocimiento operativo contextualizado. El punto central no es medir más datos, sino atribuir significado a los datos ya disponibles o fácilmente adquiribles.

En el sector cerámico, donde energía, calidad, productividad y competitividad están estrechamente vinculadas, esta contextualización puede generar valor concreto. Vincular el consumo energético a activo, línea, estado operativo, fase de proceso y entrada del operador permite identificar consumos improductivos, anomalías, pérdidas y prioridades de intervención.

La metodología propuesta no pretende realizar inmediatamente un Digital Twin completo. Propone, en cambio, un primer paso concreto, medible y de bajo riesgo: una PoC OT-Edge de 6–8 semanas para validar si la contextualización semántica de los datos energéticos puede apoyar decisiones operativas y oportunidades de ahorro.

El Energy Twin se convierte así en un puente pragmático entre la monitorización energética tradicional y el Digital Twin industrial. Una base de datos energético-operativa bien construida puede apoyar no solo cuadros de mando y KPI, sino también futuros modelos de detección de anomalías, optimización de procesos, mantenimiento, calidad, descarbonización y planificación estratégica.

En síntesis, la propuesta pretende demostrar que el Energy Twin no debe entenderse como una tendencia tecnológica más, sino como una metodología pragmática para transformar datos energéticos contextualizados en una ventaja competitiva real, medible y sostenible para la industria cerámica.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 62264 / ISA-95, Enterprise-control system integration.
- [2] IEC 62443, Industrial communication networks — Network and system security.
- [3] ISO 50001, Energy management systems — Requirements with guidance for use.
- [4] MQTT, OASIS Standard, Message Queuing Telemetry Transport.
- [5] Industrial Internet Consortium, Industrial Internet Reference Architecture.
- [6] Documentación técnica de referencia sobre bases de datos time-series, edge computing y contextualización de datos industriales.