



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

U P I I T A

*“Arquitectura IoT para el Monitoreo
y Detección de Anomalías en
el Consumo Eléctrico Residencial”*

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Telemática”

Presenta el alumno:

Cordero Montes de Oca Luis Alberto

Huerta Trujillo Iliac

Villordo Jimenez Iclia

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Índice general

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
1 Introducción	1
1.1 Contexto y motivación	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Objetivos	1
1.3.1 Objetivo general	1
1.3.2 Objetivos específicos	1
1.4 Alcance y limitaciones	1
1.5 Estructura del documento	1
2 Estado del Arte	2
2.1 Arquitecturas IoT	2
2.1.1 Modelos de referencia y estandarización	2
2.1.2 Capas funcionales y patrón Edge–Fog–Cloud	3
2.1.3 Planos transversales: seguridad, gestión y observabilidad	3
2.1.4 Mensajería y acoplamiento	4
2.1.5 Datos y analítica para detección de anomalías	4
2.1.6 Buenas prácticas y decisiones de diseño	4
2.2 Protocolos y mensajería	4
2.2.1 MQTT: telemetría ligera con publish/subscribe	5
2.2.2 CoAP: request/response ligero sobre UDP	5
2.2.3 HTTP/REST y WebSockets: integración y streaming a aplicaciones	5
2.2.4 OPC UA: semántica y seguridad integradas en OT	6
2.2.5 Formatos de payload y serialización	6
2.2.6 Patrones de diseño de mensajería	6
2.2.7 Seguridad de transporte y extremos	6
2.2.8 Criterios de selección para consumo energético y anomalías	7
2.3 Plataformas y servicios	7
2.3.1 Brokers de mensajería y gateways	7
2.3.2 Ingesta y canalización	7
2.3.3 Almacenamiento de series temporales (TSDB)	8
2.3.4 Procesamiento de flujos y lotes	10
2.3.5 Orquestación y contenedores	10
2.3.6 Dashboards, APIs y alertamiento	10

2.3.7 Seguridad, gobernanza y cumplimiento	10
2.3.8 Criterios de selección para IoT energético	11
2.4 Trabajos relacionados	11
3 Marco Teórico	12
3.1 Fundamentos de medición y energía	12
3.2 Protocolos IoT y seguridad	12
3.3 Modelos y técnicas de detección de anomalías	12
4 Análisis del Sistema	13
4.1 Requerimientos funcionales	13
4.2 Requerimientos no funcionales	13
4.3 Casos de uso y actores	13
4.4 Riesgos y supuestos	13
5 Diseño del Sistema	14
5.1 Arquitectura propuesta	14
5.2 Diseño de datos y tópicos	14
5.3 Diseño de servicios e interfaces	14
5.4 Diagramas de componentes y secuencia	14
6 Implementación del Sistema	15
6.1 Entorno y herramientas	15
6.2 Módulos implementados	15
6.3 Configuración y despliegue	15
6.4 Ejemplos de código	15
7 Pruebas y Resultados	16
7.1 Plan y metodología de pruebas	16
7.2 Pruebas funcionales e integración	16
7.3 Rendimiento y escalabilidad	16
7.4 Resultados y discusión	16
8 Conclusiones y Trabajo Futuro	17
8.1 Conclusiones	17
8.2 Limitaciones	17
8.3 Líneas de trabajo futuro	17
A Guía de despliegue	18
B Datasets e instrumentación	19
C Documentación adicional	20
Referencias	21

Índice de cuadros

2.1 Comparativa de TSDBs para telemetría IoT energética	9
---	---

Índice de figuras

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto y motivación

1.2 Planteamiento del problema

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

1.3.2 Objetivos específicos

1.4 Alcance y limitaciones

1.5 Estructura del documento

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Arquitecturas IoT

Las arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT) proporcionan marcos de referencia para estructurar sistemas distribuidos que abarcan dispositivos físicos, comunicación, procesamiento y aplicaciones. Su correcta selección e implementación es de gran importancia para asegurar requisitos no funcionales como escalabilidad, resiliencia y seguridad, especialmente en escenarios de telemetría energética y detección de consumos anómalos en tiempo real.

2.1.1 Modelos de referencia y estandarización

Existen diversos modelos de referencia que guían el diseño de soluciones IoT, cada uno con énfasis distinto en dominios industriales, interoperabilidad o gobernanza:

- **IoT-A (The IoT Architectural Reference Model)**: Proporciona abstracciones de alto nivel (dominio, información, comunicación, funcional, seguridad) y un metamodelo que promueve interoperabilidad semántica entre objetos y servicios [6]. Es útil para mantener consistencia conceptual en sistemas heterogéneos.
- **IIRA (Industrial Internet Reference Architecture)** del Industrial Internet Consortium: Estructura el sistema en *viewpoints* (business, usage, functional, implementation) y define dominios funcionales (control, operaciones, información, aplicación) con foco en integración OT/IT y requisitos industriales (seguridad, confiabilidad, disponibilidad) [5]. Adecuado para plantas industriales y energía.
- **RAMI 4.0** (Reference Architectural Model Industry 4.0): Modelo tridimensional que alinea capas (del activo físico a la comunicación y la integración), jerarquía de la ISA-95 y ciclo de vida del producto [1]. Útil para trazabilidad, gemelos digitales y conformidad en manufactura/energía.
- **NIST IoT-Reference**: Define funciones nucleares (sensing, communication, data processing, applications, y seguridad transversal) con énfasis en gestión de riesgos y conformidad [13], [30].
- **Arquitectura 5C** (Connection, Conversion, Cyber, Cognition, Configuration): Centrada en manufactura inteligente y mantenimiento predictivo, introduce una progresión desde adquisición hasta realimentación autónoma [17].

Para proyectos de monitoreo energético residencial o industrial ligero, IoT-A y NIST facilitan la interoperabilidad y la gestión del riesgo; para entornos industriales con integración de SCADA/PLC, IIRA y RAMI 4.0 aportan patrones robustos y vocabularios alineados a estándares.

2.1.2 Capas funcionales y patrón Edge–Fog–Cloud

Un patrón ampliamente adoptado organiza la solución en capas: *device/edge*, *fog/gateway* y *cloud*, lo que permite distribuir cómputo, almacenamiento y control según latencia y costo [22], [25].

1. **Capa de Dispositivo/Percepción:** Sensores/actuadores, medición de potencia/energía, muestreo, preprocesamiento ligero (filtro, compresión, extracción de rasgos básicos). Requisitos: bajo consumo, fiabilidad, sincronización temporal.
2. **Capa de Borde (Edge/Fog/Gateway):** Agregación de flujos, normalización, seguridad (terminación TLS), control de calidad de servicio, inferencia de baja latencia (detección temprana de anomalías) y *store-and-forward*. Protocolos típicos: MQTT, CoAP, OPC UA [18], [21], [24].
3. **Capa de Nube:** Ingesta a gran escala, almacenamiento *time-series*, procesamiento por lotes/streaming, entrenamiento de modelos y visualización. Aquí se prioriza elasticidad, gestión de datos históricos y analítica avanzada.

Este desacoplamiento reduce latencia, delimita dominios de fallo y permite optimizar costos (cómputo intensivo en la nube; decisiones inmediatas en el borde). En detección de consumos anómalos, ejecutar reglas de primer nivel (umbrales, z-scores, modelos ligeros) en el edge mitiga eventos falsos y mejora tiempos de reacción, mientras que la nube refina detecciones con modelos estacionales o de *deep learning*.

2.1.3 Planos transversales: seguridad, gestión y observabilidad

Independientemente del particionado en capas, tres planos transversales sostienen la operación:

- **Seguridad (*security by design*):** identidad del dispositivo (X.509), autenticación/autorización por tópicos MQTT, cifrado extremo a extremo (TLS 1.2+), rotación de credenciales y *secure boot* [13], [21]. El principio de privilegio mínimo debe reflejarse en ACLs y particionamiento de redes.
- **Gestión del ciclo de vida (device management):** provisión, configuración remota, actualización OTA, inventario y retirada. Estándares como LwM2M/OMA facilitan interoperabilidad [27].
- **Observabilidad:** métricas, logs y trazas distribuidas desde edge a cloud; retención diferenciada para series temporales; paneles de control y alertamiento con umbrales adaptativos.

2.1.4 Mensajería y acoplamiento

Los buses de mensajería desacoplados permiten elasticidad y resiliencia. **MQTT** es dominante por su ligereza y soporte de QoS, **CoAP** para dispositivos extremadamente restringidos, y **OPC UA** en entornos industriales que requieren modelado semántico y seguridad integrada [18], [21], [24]. La selección debe considerar:

1. *Patrones de comunicación: publish/subscribe vs. request/response.*
2. *QoS y latencia:* QoS 1/2 para eventos críticos; retención para últimas lecturas; *backpressure*.
3. *Esquemas de tópicos y contratos:* nombres jerárquicos ('site/area/device/metric') y formatos auto-descriptivos (JSON/CBOR) con versión.

2.1.5 Datos y analítica para detección de anomalías

Para consumos anómalos, el diseño de datos es determinante: granularidad temporal, agregaciones por ventana, manejo de estacionalidad, metadatos de dispositivo y normalización. En el borde, modelos ligeros (EWMA, ARIMA básico, bosque aleatorio compacto) pueden filtrar anomalías evidentes; en la nube, enfoques más pesados (LSTM, autoencoders, Prophet) capturan estacionalidad diaria/semanal [16], [19], [28]. Es recomendable separar:

- *Plano de características* (extracción/ingeniería de variables).
- *Plano de inferencia* (serving de modelos con control de versiones).
- *Plano de explicación* (importancias, SHAP, reglas).

2.1.6 Buenas prácticas y decisiones de diseño

- **Criterio de colocación:** colocar lógica donde minimice latencia y costo y maximice confiabilidad (p. ej., cortes de red → lógica esencial en edge).
- **Desacoplar por contratos:** usar contratos versionados de mensajes y pruebas de compatibilidad.
- **Seguridad desde el inicio:** identidades por dispositivo, TLS obligatorio, ACL por tópico, rotación periódica.
- **Observabilidad end-to-end:** trazabilidad desde sensor hasta alerta; KPIs por etapa.

2.2 Protocolos y mensajería

La selección de protocolos de mensajería en IoT condiciona latencia, consumo energético, confiabilidad y seguridad del sistema. En monitoreo de consumo eléctrico y detección de anomalías, predominan protocolos ligeros orientados a telemetría (**MQTT**, **CoAP**) junto con **HTTP/REST** y **WebSockets** para integración de aplicaciones, y **OPC UA** en escenarios industriales con fuerte semántica y requisitos de conformidad [7], [18], [21], [24].

2.2.1 MQTT: telemetría ligera con publish/subscribe

MQTT es un protocolo de mensajería ligero sobre TCP con patrón *publish/subscribe* y un *broker* central (por ejemplo, Mosquitto, EMQX). Ofrece niveles de calidad de servicio (QoS 0, 1 y 2), retención de mensajes y sesiones persistentes, lo que lo hace idóneo para enlaces inestables y dispositivos con recursos limitados [21].

- *Topologías y contratos*: la semántica de tópicos suele ser jerárquica (`site/area/device/metric`) y conviene versionar (`v1/`) para evitar acoplamiento rígido.
- *QoS*: QoS 1/2 reducen pérdida de datos a costa de mayor latencia y tráfico; en energía, métricas críticas (alarmas) suelen usar QoS 1 y lecturas de alta frecuencia, QoS 0.
- *Retained & LWT*: el mensaje retenido entrega el último estado a suscriptores tardíos; el *Last Will and Testament* notifica desconexiones inesperadas para mejorar observabilidad.
- *Seguridad*: TLS 1.2+ con autenticación por certificados X.509 y ACL por tópico en el broker; para clientes muy restringidos, credenciales rotadas y políticas de mínimo privilegio [13].

Variantes como **MQTT-SN** operan sobre UDP y reducen cabeceras para redes muy restringidas (LPWAN).

2.2.2 CoAP: request/response ligero sobre UDP

CoAP implementa un estilo *RESTful* para dispositivos restringidos sobre UDP, con confirmación opcional (CON/NON), *observe* para notificaciones tipo *server push* y soporte de **DTLS** para seguridad [3], [24]. Su modelo *resource-oriented* y payloads compactos (p. ej., CBOR) son útiles en redes LLN (6LoWPAN).

- *Modos confiables*: mensajes confirmables (CON) ofrecen fiabilidad similar a QoS 1; *block-wise transfer* soporta cargas mayores.
- *Seguridad*: DTLS 1.3 o OSCORE para cifrado extremo a extremo a nivel de objeto en entornos con proxies.

2.2.3 HTTP/REST y WebSockets: integración y streaming a aplicaciones

HTTP/REST sigue dominando la integración con sistemas TI y paneles de control por su ubicuidad y semántica clara [7]. Para telemetría en tiempo casi real a dashboards, **WebSockets** permiten canal bidireccional y estable reduciendo la sobrecarga de sondeo.

- *Patrones*: IoT ingiere vía MQTT/CoAP y expone APIs REST para consulta histórica y gestión; WebSockets para actualizaciones en vivo.
- *Seguridad*: TLS obligatorio (HTTPS/WSS), OAuth2/OpenID Connect para autenticación de usuarios y *API keys* o mTLS para *machine-to-machine*.

2.2.4 OPC UA: semántica y seguridad integradas en OT

OPC UA combina modelo de información rico, servicios de descubrimiento, suscripción y seguridad integrada (cifrado, firma, políticas de usuario) [18]. En energía industrial, facilita interoperabilidad con PLC/SCADA y modelado semántico de activos. Para dispositivos muy restringidos, su costo puede ser elevado; es común integrarlo en gateway/edge que publica hacia la nube vía MQTT (puente MQTT–OPC UA).

2.2.5 Formatos de payload y serialización

La carga útil debe equilibrar compacidad, legibilidad y costos de serialización:

- **JSON**: legible y ampliamente soportado; mayor tamaño. Útil para integración rápida.
- **CBOR**: binario compacto y eficiente para dispositivos y CoAP [4].
- **Protocol Buffers**: esquemas versionados y eficientes, ventajosos para pipelines de alto volumen y control de contratos [12].

Se recomienda versionar esquemas, incluir marcas de tiempo normalizadas (UTC, ISO 8601) y metadatos (ID de dispositivo, calidad, unidad) para reproducibilidad y detección de anomalías.

2.2.6 Patrones de diseño de mensajería

- **Topic design**: jerarquías por ubicación/activo/métrica, evitando comodines en producción para limitar exposición y costos.
- **Backpressure**: uso de colas/búferes en edge (*store-and-forward*), límites de *in-flight* y gestión de reconexiones exponenciales.
- **Idempotencia y orden**: claves de deduplicación y *sequencing* para series temporales; en MQTT, no hay garantía de orden global con múltiples publicadores.
- **QoS-aware routing**: enrutar mensajes críticos por canales con QoS superior; agrupar telemetría de baja prioridad en lotes para eficiencia.

2.2.7 Seguridad de transporte y extremos

- **TLS/DTLS**: cifrado en tránsito, PFS y suites modernas (AES-GCM/ChaCha20-Poly1305) [3].
- **mTLS**: autenticación mutua para dispositivos y gateways; gestión de PKI con rotación y revocación.
- **Autorización por tópico/recurso**: ACL por patrón de tópico (MQTT) o ruta (CoAP/HTTP); principio de mínimo privilegio.
- **E2E en entornos con proxy**: OSCORE (CoAP) y cifrado a nivel de payload cuando el proxy debe operar solo con metadatos.

2.2.8 Criterios de selección para consumo energético y anomalías

Para detección de consumos anómalos:

- **MQTT** con QoS 1 para eventos/alarmas y QoS 0 para telemetría de alta frecuencia, retenidos para estados; TLS y ACL estrictas en broker.
- **CoAP** con confirmables (CON) y CBOR cuando los dispositivos sean muy restringidos o operen sobre 6LoWPAN/LPWAN.
- **HTTP/REST** para APIs de consulta histórica y administración; **WebSockets** para dashboards en vivo.
- **Puentes OPC UA–MQTT** cuando se integra OT/SCADA con analítica en la nube.

La decisión final debe balancear consumo de ancho de banda, latencia requerida para alertas, capacidad del dispositivo y requisitos de seguridad y conformidad.

2.3 Plataformas y servicios

Las plataformas para IoT integran la cadena de valor desde la ingestión de telemetría hasta la analítica y visualización. En escenarios de consumo energético y detección de anomalías, los componentes clave incluyen: *brokers* de mensajería, *ingestors*, almacenamiento de series temporales, procesamiento de flujos y lotes, orquestación y tableros. La selección debe balancear latencia, costo, elasticidad, gobernanza y seguridad.

2.3.1 Brokers de mensajería y gateways

Los **brokers MQTT** (Eclipse Mosquitto, EMQX, HiveMQ) son la columna vertebral de la telemetría [21]. Ofrecen *topic ACLs*, persistencia, retención, *bridges* y plugins para extender autenticación/autorización y observabilidad. **CoAP** suele desplegarse con *proxies* y *resource directories* para descubrimiento [24]. En entornos industriales, **OPC UA** se integra en *gateways* que traducen a MQTT para la nube [18].

- *Criterios*: soporte de TLS/mTLS, control fino de ACL por tópico, cuotas, gestión de sesiones, *bridging multi-tenant*, métricas nativas.
- *Operación*: alta disponibilidad con clúster activo-activo y *retained stores* replicados; backpressure y límites *in-flight*.

2.3.2 Ingesta y canalización

La ingestión desacopla dispositivos de servicios de almacenamiento/analítica. Patrones comunes:

- **Puentes MQTT→TSDB/Stream**: conectores nativos o *functions* del broker para enrutar a bases de series de tiempo o buses de streaming.

- **Buses de datos** (Kafka/Pulsar): proporcionan *durability*, particionado y *replay* para flujos de alta tasa [9], [10]. Útiles cuando múltiples consumidores (detección online, archivado, aprendizaje) comparten el mismo *topic*.
- **ETL/ELT**: normalización, validación de esquemas (JSON Schema/Protobuf), enriquecimiento (metadatos de dispositivo) y control de versiones de contratos.

2.3.3 Almacenamiento de series temporales (TSDB)

Las **TSDB** optimizan escrituras en ráfaga, compresión y *downsampling* con retención por políticas. Alternativas populares incluyen **InfluxDB**, **TimescaleDB** y **Prometheus** (sobre todo para métricas operativas) [2], [14], [29]. Para consumo energético:

- *Requisitos*: escrituras sostenidas, agregaciones por ventana, alineación temporal, etiquetado por `device/site/metric`, y consultas por rango.
- *Esquemas*: diseño basado en *measurement + tags* (InfluxDB) o tablas particionadas por tiempo (TimescaleDB); compresión *delta-of-delta* y *gorilla* para eficiencia.
- *Retención*: políticas multi-tier (crudo por días, agregados por meses) para optimizar costos.

Cuadro 2.1: Comparativa de TSDBs para telemetría IoT energética

Criterio	InfluxDB	TimescaleDB	Prometheus
Modelo de datos	Measurements + tags/fields; series identificadas por tags	PostgreSQL + extensiones; hypertables/particiones	Series etiquetadas (metrics + labels); enfoque en métricas operativas
Ingesta	Alta tasa nativa; Line Protocol; conectores MQTT/Kafka	Ingesta vía SQL/FDW/ingestor push vía gateway; buena integración con ecosistema	Pull (scrape) y PromQL; consultas operativas para monitoreo/alertas
Consultas	Flux/SQL (según edición); agregaciones y down-sampling	SQL estándar + funciones de time-series; facilidad de joins	Compresión específica por bloques en TSDB
Compresión	Delta-of-delta, Gorilla, TSM/TSI	Compresión de PostgreSQL + compresión por chunks	Compresión por tiempo/espacio; pensado para métricas
Retención	Políticas por bucket; downSampling automático	Políticas por partición/retención; administración vía SQL	Federación y sharding vía proyectos complementarios
Escalabilidad	OSS single-node; Enterprise/Cloud con clustering	Escala vertical + particionado; replicación nativa de Postgres	Observabilidad (métricas app/infra), alertas, paneles
Casos de uso típicos	Telemetría IoT, sensores, analítica temporal general	IoT + analítica relacional; integración con datos de negocio	OSS (Apache 2.0)
Licencia	OSS + ofertas comerciales (Cloud/Enterprise)	License para algunas features	Stack de observabilidad, Grafana, Alertmanager
Ecosistema	Conectores a Grafana, Telegraf, Kapacitor	Ecosistema Postgres, extensiones, Grafana	Útil para métricas operativas; menos óptimo para series crudas densas
Adecuación a consumo energético	Muy buena para series densas y downSampling	Excelente si necesita joins con datos de negocio y SQL	

2.3.4 Procesamiento de flujos y lotes

La detección de anomalías requiere tanto **stream processing** (detección temprana) como **batch** (modelado y recalibración):

- **Stream:** Apache Flink, Spark Structured Streaming, Kafka Streams permiten ventanas deslizantes/tumbling, *watermarks* y estado gestionado para reglas y modelos online [8], [26].
- **Batch:** Spark/Beam para entrenamiento y análisis histórico; orquestado por Airflow/Luigi con *feature stores*.
- **Model serving:** *microservicios* con REST/gRPC o *serverless* para inferencia; control de versiones de modelos y *shadow deployments*.

2.3.5 Orquestación y contenedores

La estandarización de despliegues facilita portabilidad del borde a la nube:

- **Contenedores** (Docker/OCI) y **Kubernetes** para elasticidad y gestión declarativa [11]. En el borde, **K3s** y **Azure IoT Edge/AWS IoT Greengrass** facilitan módulos, *twin state* y despliegues OTA [20], [23].
- **IaC:** Terraform/Ansible para reproducibilidad; *secrets management* (Vault/KMS) y políticas de seguridad.

2.3.6 Dashboards, APIs y alertamiento

La plataforma debe exponer:

- **APIs** REST/GraphQL para consulta histórica y administración; **WebSockets** para actualizaciones en vivo.
- **Dashboards** (Grafana, Kibana, superset) con paneles por dispositivo, métricas agregadas y eventos [15].
- **Alertas:** umbrales dinámicos, detecciones por modelo y correlación de eventos; integración con email, webhooks y mensajería.

2.3.7 Seguridad, gobernanza y cumplimiento

Las plataformas deben incorporar *security-by-default* y gobernanza de datos:

- **Identidad y acceso:** mTLS para dispositivos/gateways; IAM centralizado; ACL por tópico/recurso; rotación de credenciales y revocación.
- **Data governance:** clasificación de datos, *data lineage*, retención y anonimización donde aplique.
- **Cumplimiento:** lineamientos NIST para capacidad base de ciberseguridad en IoT [13].

2.3.8 Criterios de selección para IoT energético

- **Broker** con TLS/mTLS, ACL por tópico, sesiones persistentes y métricas exportables.
- **TSDB** con retención por niveles y consultas eficientes por *tags*.
- **Stream processor** con ventanas y estado para reglas de primer nivel; **batch** para recalibración de modelos.
- **Dashboards** con soportes de anotaciones y correlaciones; APIs bien definidas para integración externa.

2.4 Trabajos relacionados

Capítulo 3

Marco Teórico

- 3.1 Fundamentos de medición y energía**
- 3.2 Protocolos IoT y seguridad**
- 3.3 Modelos y técnicas de detección de anomalías**

Capítulo 4

Análisis del Sistema

4.1 Requerimientos funcionales

4.2 Requerimientos no funcionales

4.3 Casos de uso y actores

4.4 Riesgos y supuestos

Capítulo 5

Diseño del Sistema

- 5.1 Arquitectura propuesta**
- 5.2 Diseño de datos y tópicos**
- 5.3 Diseño de servicios e interfaces**
- 5.4 Diagramas de componentes y secuencia**

Capítulo 6

Implementación del Sistema

6.1 Entorno y herramientas

6.2 Módulos implementados

6.3 Configuración y despliegue

6.4 Ejemplos de código

Capítulo 7

Pruebas y Resultados

- 7.1 Plan y metodología de pruebas**
- 7.2 Pruebas funcionales e integración**
- 7.3 Rendimiento y escalabilidad**
- 7.4 Resultados y discusión**

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo Futuro

8.1 Conclusiones

8.2 Limitaciones

8.3 Líneas de trabajo futuro

Apéndice A

Guía de despliegue

Apéndice B

Datasets e instrumentación

Apéndice C

Documentación adicional

Referencias

- [1] P. I. 4.0, *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*, Accessed 2025-11-06, 2015. dirección: <https://www.plattform-i40.de/>
- [2] T. P. Authors, *Prometheus — Monitoring system & time series database*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://prometheus.io/>
- [3] D. Benjamin et al., *The Datagram Transport Layer Security (DTLS) Protocol Version 1.3, RFC 9147*, IETF RFC, Accessed 2025-11-06, 2022. dirección: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9147>
- [4] C. Bormann y P. Hoffman, *CBOR — Concise Binary Object Representation, RFC 8949*, IETF RFC, Accessed 2025-11-06, 2020. dirección: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8949>
- [5] I. I. Consortium, *The Industrial Internet of Things, Volume G1: Reference Architecture v1.9*, Accessed 2025-11-06, 2019. dirección: <https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>
- [6] T. I.-A. Consortium, *Internet of Things - Architectural Reference Model (IoT-A ARM)*, Project Deliverables, Accessed 2025-11-06, 2013. dirección: <https://www.iot-a.eu/>
- [7] R. T. Fielding, “Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures”, en *Doctoral dissertation, University of California, Irvine*, 2000. dirección: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/rest_arch_style.htm
- [8] A. S. Foundation, *Apache Flink — Stateful Computations over Data Streams*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://flink.apache.org/>
- [9] A. S. Foundation, *Apache Pulsar*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://pulsar.apache.org/>
- [10] A. S. Foundation, *Kafka: A Distributed Streaming Platform*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://kafka.apache.org/>
- [11] C. N. C. Foundation, *Kubernetes Documentation*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://kubernetes.io/docs/home/>
- [12] Google, *Protocol Buffers*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://developers.google.com/protocol-buffers>
- [13] P. A. Grassi, M. Fagan, J. Voas et al., *NISTIR 8259A: Core Device Cybersecurity Capability Baseline for Securable IoT Devices*, Accessed 2025-11-06, 2020. dirección: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/nistir/8259a/final>
- [14] InfluxData, *InfluxDB: Open Source Time Series Platform*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://www.influxdata.com/products/influxdb/>

- [15] G. Labs, *Grafana Documentation*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://grafana.com/docs/>
- [16] N. Laptev, S. Amizadeh e I. Flint, “Time-series Extreme Event Forecasting with Neural Networks at Uber”, en *ICML 2015 Workshop on Deep Learning*, 2015. dirección: <https://arxiv.org/abs/1710.10917>
- [17] J. Lee, B. Bagheri y H.-A. Kao, “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems”, *Manufacturing Letters*, vol. 3, págs. 18-23, 2015. DOI: [10.1016/j.mfglet.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001)
- [18] W. Mahnke, S.-H. Leitner y M. Damm, *OPC Unified Architecture*. Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-68899-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68899-0)
- [19] P. Malhotra, L. Vig, G. Shroff y P. Agarwal, “Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series”, en *ESANN*, 2015. dirección: <https://arxiv.org/abs/1607.00148>
- [20] Microsoft, *Azure IoT Edge documentation*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://learn.microsoft.com/azure/iot-edge/>
- [21] OASIS, *MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01*, Accessed 2025-11-06, 2015. dirección: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/>
- [22] M. Satyanarayanan, “The Emergence of Edge Computing”, *Computer*, vol. 50, n.º 1, págs. 30-39, 2017. DOI: [10.1109/MC.2017.9](https://doi.org/10.1109/MC.2017.9)
- [23] A. W. Services, *AWS IoT Greengrass*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://docs.aws.amazon.com/greengrass/>
- [24] Z. Shelby, K. Hartke y C. Bormann, *The Constrained Application Protocol (CoAP)*, *RFC 7252*, IETF RFC, Accessed 2025-11-06, 2014. dirección: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7252>
- [25] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li y L. Xu, “Edge Computing: Vision and Challenges”, en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, 2016, págs. 637-646. DOI: [10.1109/JIOT.2016.2579198](https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198)
- [26] A. Spark, *Structured Streaming Programming Guide*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://spark.apache.org/docs/latest/structured-streaming-programming-guide.html>
- [27] O. SpecWorks, *Lightweight M2M (LwM2M) Technical Specification*, Accessed 2025-11-06, 2020. dirección: <https://www.omaspecworks.org/what-is-oma-specworks/iot/lightweight-m2m-lwm2m/>
- [28] S. J. Taylor y B. Letham, “Forecasting at scale”, *The American Statistician*, vol. 72, n.º 1, págs. 37-45, 2018. DOI: [10.1080/00031305.2017.1380080](https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080)
- [29] I. Timescale, *TimescaleDB: Time-series Database for PostgreSQL*, Accessed 2025-11-06, 2024. dirección: <https://www.timescale.com/>
- [30] J. Voas, *NIST SP 800-183: Networks of 'Things'*, Accessed 2025-11-06, 2016. dirección: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-183/final>