

Objetivo 1: Diseño, simulación y evaluación de la capa de comunicaciones para sistemas energéticos distribuidos operando en microrredes.

Universidad de Alcalá

2 de diciembre de 2022

Web: geiser.depeca.uah.es/promint

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




Comunidad
de Madrid

Índice

- Introducción
- Mensajes en microrredes
- Identificación de tecnologías para transmisión
- Estandarización de comunicaciones
- Propuesta de arquitectura
- Validación de la arquitectura
- Integración de blockchain
- Ampliación de características con blockchain
- Ciberseguridad
- Publicaciones

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Introducción

Objetivo 1: Diseño, simulación y evaluación de la capa de comunicaciones para sistemas energéticos distribuidos operando en microrredes.

- Evaluar alternativas disponibles, haciendo factible la correcta operación de los elementos que componen las Microrredes
- Proponer una arquitectura de comunicaciones adecuada para la operación distribuida
- Validación de la arquitectura de comunicaciones

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Mensajes en Microrredes

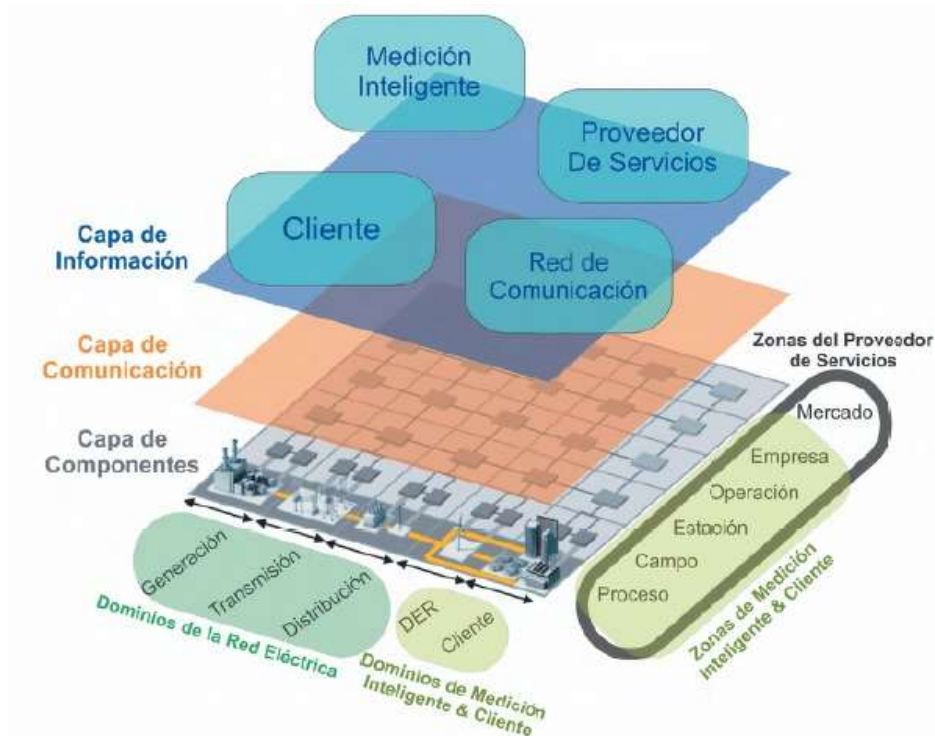


Figura 3. Relación dominios del modelo conceptual FG-Smart y la capa de componentes de SGAM

Fuente: (CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, 2014; Lee y Su, 2013; Budka, *et al.*, 2014; Nieße, *et al.*, 2014)

Las comunicaciones son uno de los ejes fundamentales para asegurar el despliegue de las Microrredes, habilitando el flujo de información necesario para operar los elementos de red y la gran cantidad de información que estos generan.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Mensajes en Microrredes

Requerimientos de aplicaciones

Aplicación	Tamaño típico de datos (bytes)	Latencia	Fiabilidad (%)
Lectura de contadores	100 - 2400	15 s – 4 h	> 98
Precio	100	< 1 min	> 98
Respuesta a la demanda	100	< 1 min	> 99,5
Operación del elemento de corte	25	< 1 min	> 98
Automatización de la distribución	100 - 1000	< 5 s	> 99,5
Restauración de cortes	25	< 20 s	> 98
Gestión del almacenamiento	25	< 5 s	> 98
Actualizaciones	25 k – 2 M	< 2 min – 7 días	> 98
Mensajería a clientes	50 – 200	< 15 s	> 99

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Mensajes en Microrredes

Mensaje	Requerimientos de latencia
Control de protecciones	4 ms
Monitorización	1 s
Control de DERs	16 ms – 100 ms
Información de operación y mantenimiento	1 s
Mensajes que requieren acciones inmediatas por los dispositivos que los reciben	3 ms – 100 ms

S. Marzal, R. Salas, R. González-Medina, G. Garcer'a, and E. Figueres, "Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 3610 – 3622, 2018

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

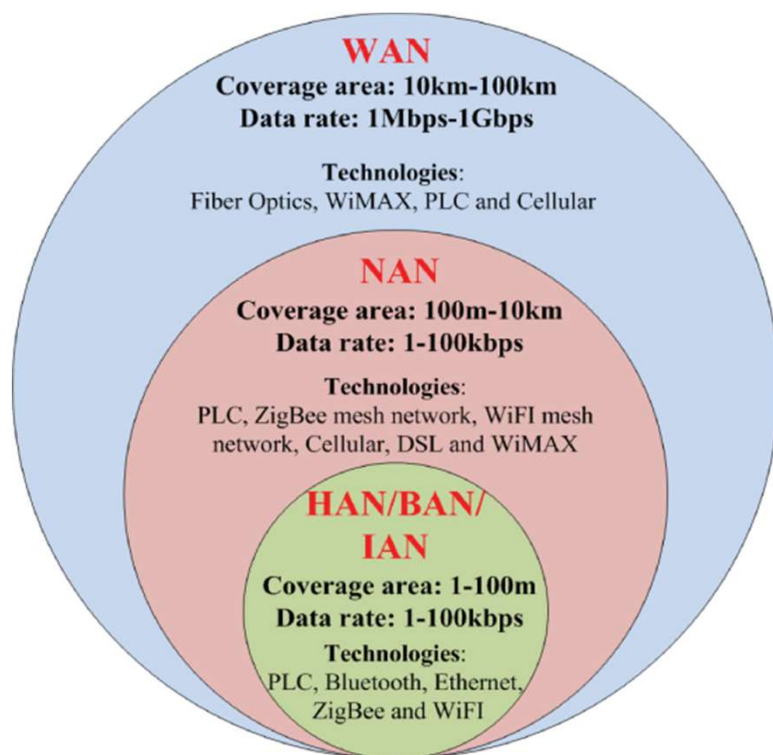
UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Identificación de tecnologías para transmisión



● Cableadas

- Ethernet y Fibra Óptica
 - Alto coste en caso de no existir infraestructura.
 - Baja latencia e inmunidad al ruido. Gran ancho de banda.

● Inalámbricas

- Wi-Fi
 - Bajo coste y gran ancho de banda.
 - Alcance bajo.
- LoRa
 - Bajo consumo
 - No es inmune a interferencias.
- Móvil (LTE, 4G, 5G, ...)
 - Gran ancho de banda y alcance.
 - Pago mensual
- WiMAX
 - Alto coste

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Resultados pruebas reales

Cumple con los requisitos de todas las aplicaciones:

- Distancias menores a 100 m: **Ethernet**
 - Latencia media: 0,8 ms
 - Latencia máxima: < 1 ms
 - Fiabilidad: 100 %
 - Inconvenientes
 - Coste de instalación
 - Hay que llevarlo físicamente
- Distancias mayores a 100 m: **Fibra óptica**
 - Inconvenientes
 - Aún mayor coste de instalación
 - Hay que llevarlo físicamente



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




Comunidad
de Madrid

Resultados pruebas reales

Alternativas válidas para aplicaciones menos exigentes:

- **Rango bajo: Wi-Fi 6**

- Inconvenientes:

- Rango: WiFi 70 m (se soluciona al mallarlo)
 - Latencia. Wi-Fi: 6 – 130 ms

- **Rango medio: LoRa**

- Inconvenientes:

- Alcance < 500 metros
 - Latencia elevada > 100 ms
 - Tiempo de transmisión en grandes distancias de hasta: 1,8 s
 - Baja fiabilidad.

- **Gran rango: Móvil (4G)**

- Inconvenientes

- Latencia: 30 – 100 ms
 - Coste por servicio
 - Dependencia de empresa de telecomunicaciones



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Resultado pruebas reales

Alternativa para todos los rangos y todas las aplicaciones: Móvil (5G)

- Características:

- Latencia: 1 – 4 ms
- Velocidad: > 50 Mbps
- Fiabilidad: 99,9999 %
- Bajo consumo de energía

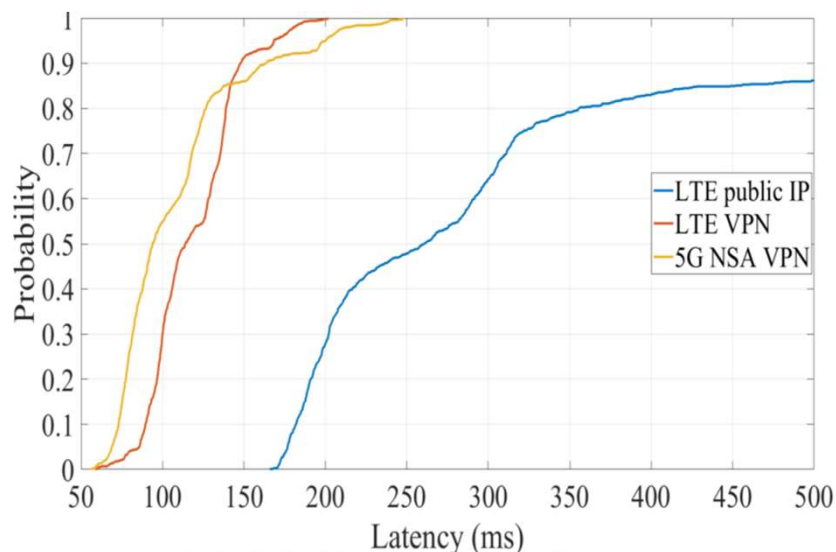
- Inconvenientes:

- Coste actual de los dispositivos
- Coste por servicio



Resultado de los test:

- El actual 5G NSA (disponible en España) no mejora sustancialmente al 4G



Parameter	LTE public IP	LTE VPN	5G NSA VPN
Mean (ms)	285.417	118.942	108.450
Median (ms)	260.843	114.120	94.06
Maximum (ms)	635.559	250.035	256.48
Minimum (ms)	165.935	59.000	56.49
Mode (ms)	268.254	97.780	102.953
Standard deviation (ms)	107.316	26.440	39.856
Reliability (%)	96.0	99.9	99.8



Estandarización de comunicaciones

Objetivos que se pretenden alcanzar:

1. Interoperabilidad. Integrar equipos de diferentes fabricantes.
2. Bajos costes en cableado y diseño.
3. Agilidad en los procesos de puesta en marcha y mantenimiento.

IEC 61850

Se basa en tres principios:

1. Modelo de información único. Estructura de datos y jerarquías unificados para emplear en los dispositivos.
2. Protocolo de comunicaciones común. Enviar la información necesaria cumpliendo los requisitos de tiempo y disponibilidad.
3. Formato de fichero de configuración. Modelo de fichero de configuración estandarizado

Se ha ido ampliando para cubrir todos los aspectos del sector eléctrico como los recursos distribuidos o la energía hidráulica.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

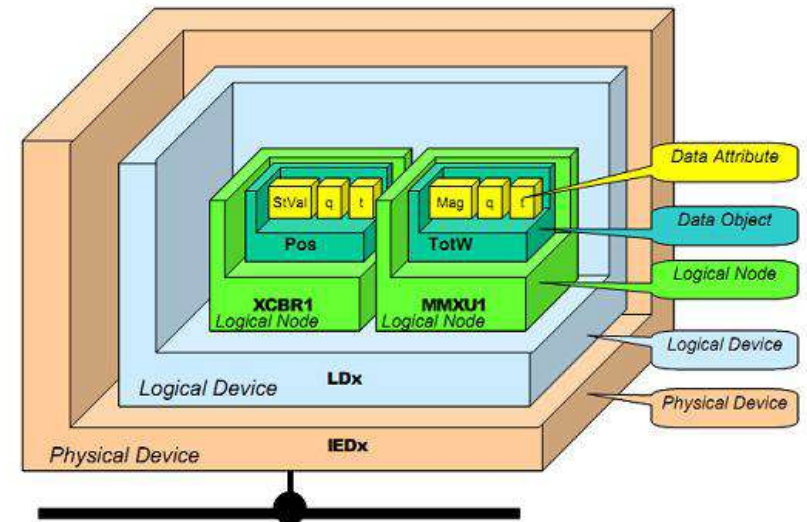


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Estandarización de comunicaciones

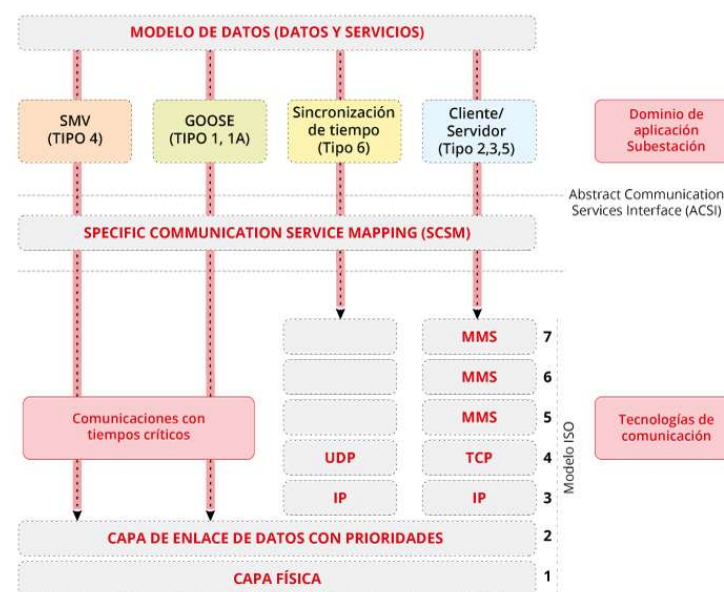
- **Dispositivo físico**
- **Dispositivo lógico.** Organiza información de cada dispositivo físico p. ej. control, protección, información, etc. Los nombres son libres.
- **Nodo lógico.** Funciones o componentes de automatización del sistema. Se identifican con 4 letras. Se encuentran definidos en la parte 7-4 del estándar.
- **Objeto.** Organiza información de cada Nodo lógico. Están definidos.
- **Atributo.** Valores que puede tomar cada Objeto. Están definidos.



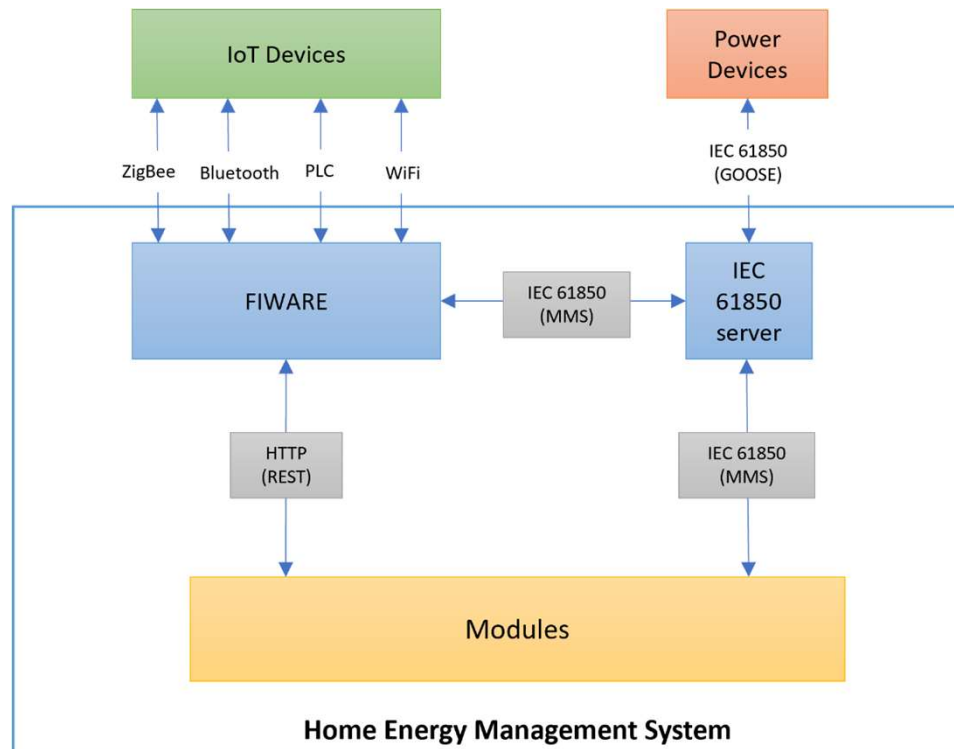
Estandarización de comunicaciones

Distintos protocolos según la información a transmitir

- **Sampled Measured Values.** Comunicación rápida de valores de medición, protección y control. Directamente sobre Ethernet (Capa 2 OSI). Mensajes estructura de publicador/suscriptor, el publicador envía los datos a todos los equipos de la red y cada equipo se suscribe a los datos para acceder a los mismos.
- **GOOSE.** Transmisión en tiempo real de eventos críticos. Estructura publicador/suscriptor. Latencia máxima de 3 ms.
- **SNTP.** Sincronización de tiempo de los dispositivos. Para la transmisión de los mensajes SNTP se utiliza el protocolo UDP (Capa 4 OSI).
- **MMS.** Intercambio de datos de la aplicación, parámetros de configuración de los dispositivos o datos de monitorización. Envía sus mensajes a través de conexiones TCP (Capa 4 OSI) y es utilizado para las comunicaciones cliente/servidor.



Propuesta de arquitectura



- En un nodo real de una Microrred hay multitud de dispositivos (cargas o sensores), que no existen en el estándar.
- El estándar IEC 61850 solo aplica a los dispositivos de la parte de potencia.
- Se propone una arquitectura que combine dispositivos IoT con dispositivos IEC 61850.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



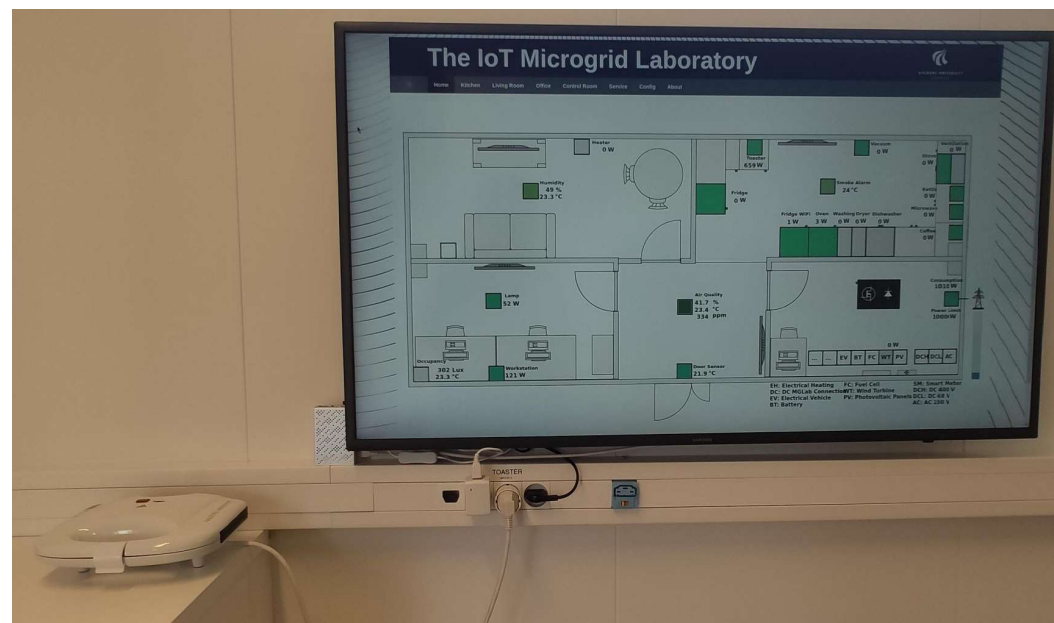
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



**Comunidad
de Madrid**

Validación de arquitectura

Center for Research on Microgrids – University of Aalborg



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

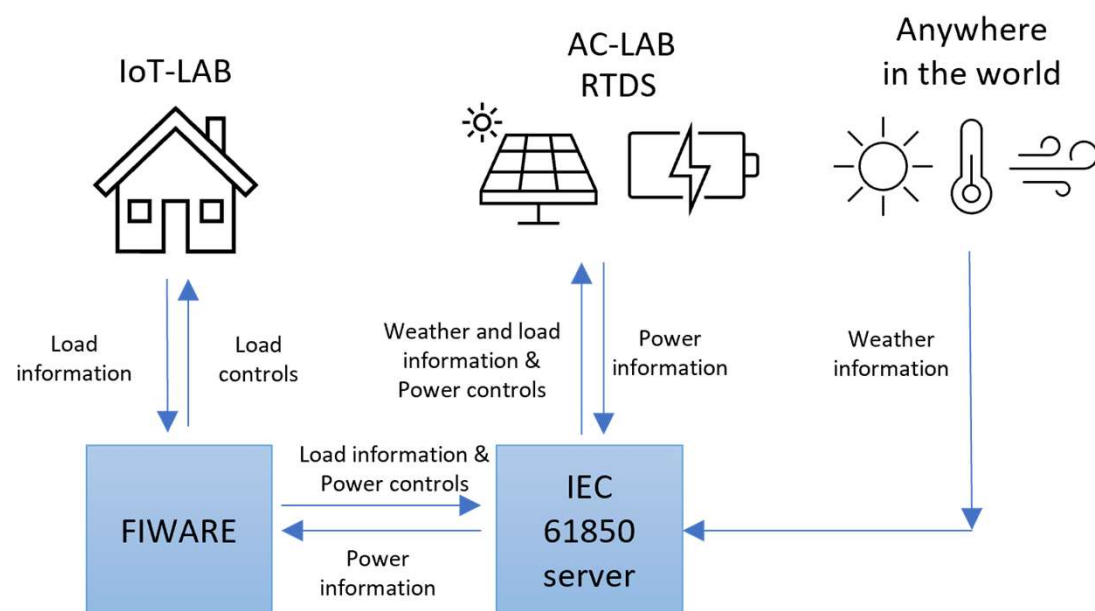


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



**Comunidad
de Madrid**

Validación de arquitectura



- Plataforma de pruebas en colaboración con la Universidad de Aalborg
- Permite testear cómo se comportarían algoritmos de flexibilidad en los dispositivos reales de su laboratorio si se encontraran cualquier parte del mundo.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

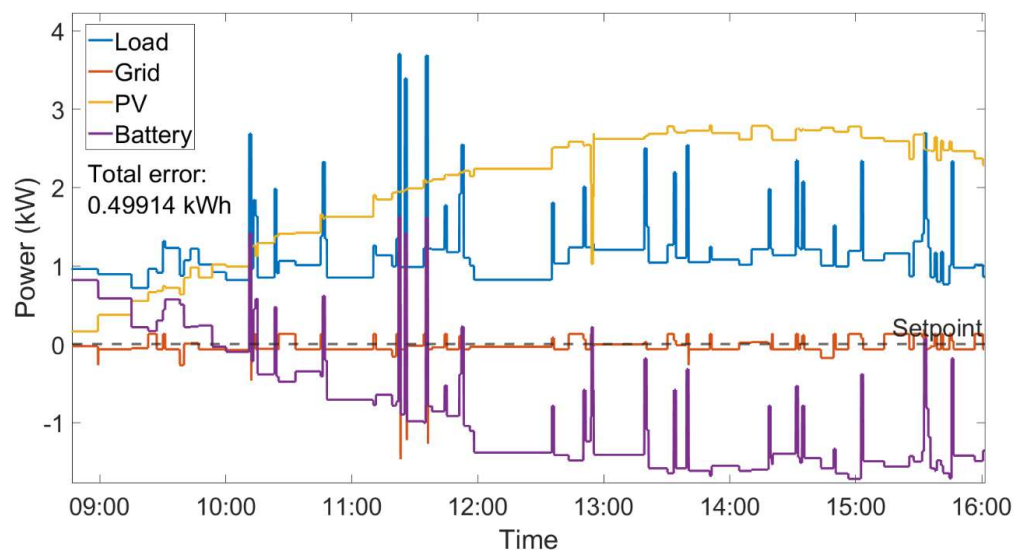


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Validación de arquitectura



- Hemos emulado la planta PV de la Universidad de Alcalá en tiempo real gracias a los sensores instalados.
- Hemos comprobado varios algoritmos de flexibilidad frente al laboratorio de la Universidad de Aalborg.
- Ejemplo de algoritmo de inyección cercana a cero en momentos de exceso de energía.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

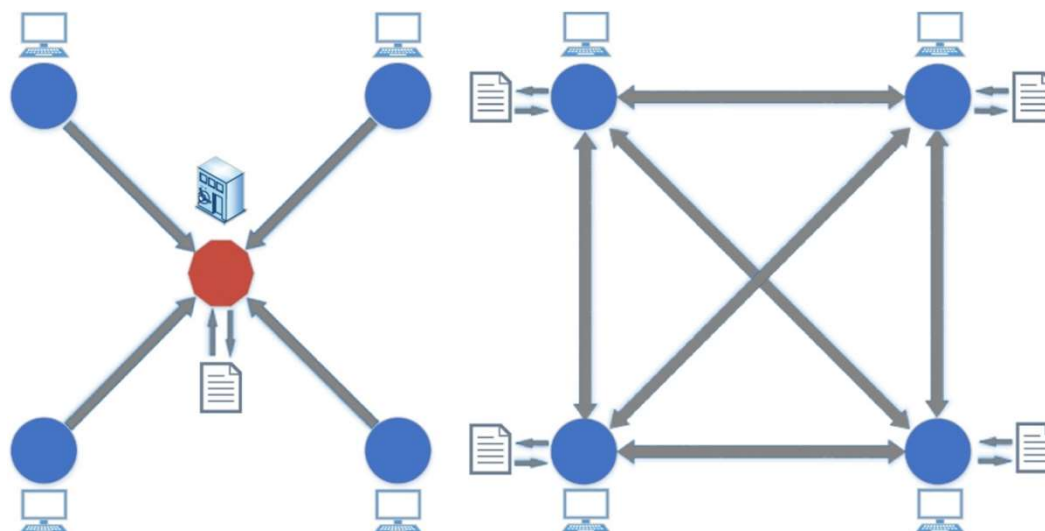



Comunidad
de Madrid

Integración de Blockchain

● Comunicación P2P

- Se ha identificado la tecnología Blockchain como herramienta clave para crear redes de comunicación P2P en Microrredes.
- Al distribuir las comunicaciones y el control aumenta drásticamente la escalabilidad.
- Compatible con el estándar IEC 61850.
- Banco de pruebas formado por varias Raspberry Pi 4 Model B



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



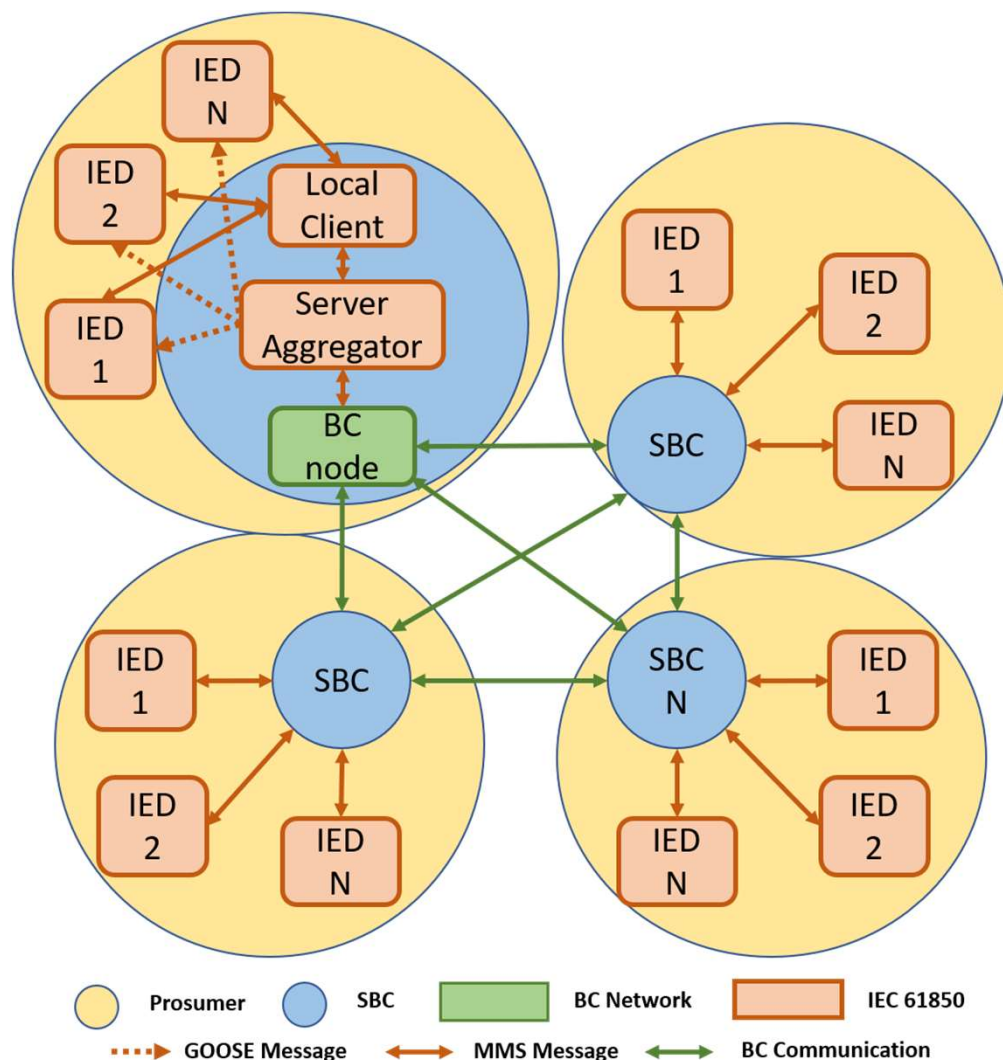
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Integración de Blockchain

Propuesta de arquitectura de comunicaciones



- Cada prosumidor tiene sus IEDs compatibles con el estándar IEC 61850
- Se añade un ordenador de placa simple a su instalación
- Incorpora un nodo Blockchain que se comunica con el resto de nodos de la red

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

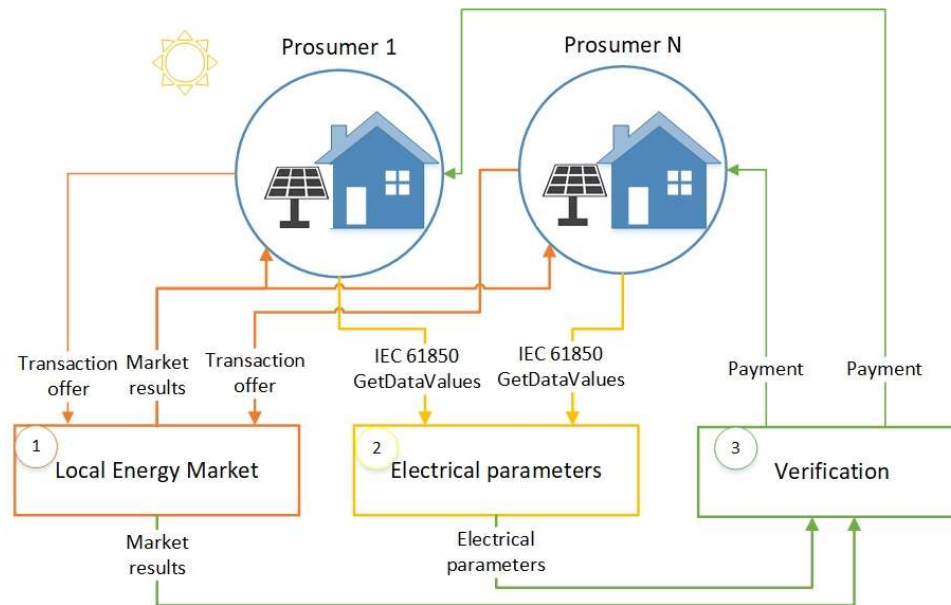


**Comunidad
de Madrid**

Integración de Blockchain

- Mercado local de energía

- Se ha diseñado un mercado local para Microrredes mediante contratos inteligentes
- Permite la compra-venta de energía entre usuarios de una Microrred
- Aumenta el rendimiento de la inversión en generadores de pequeño tamaño y baterías
- Asegura la inmutabilidad de los parámetros eléctricos, dificultando el fraude



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



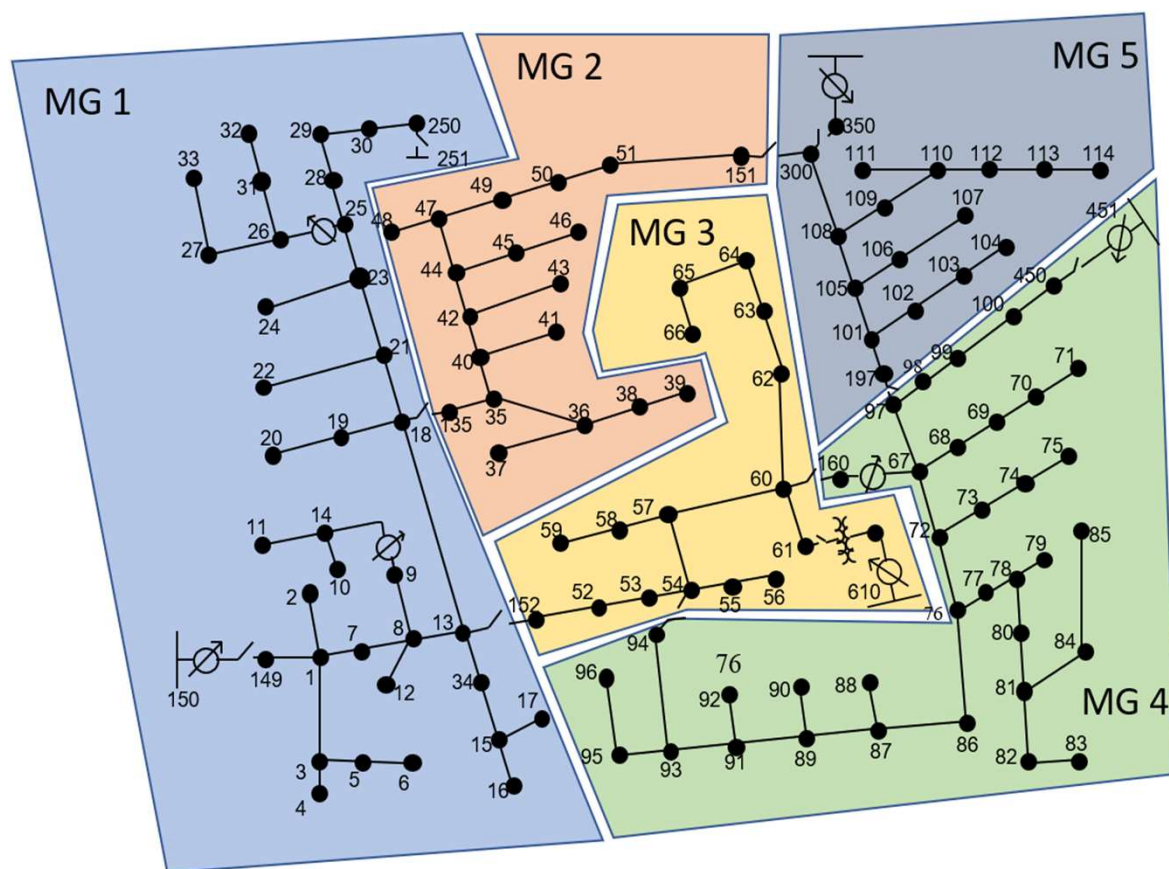
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



**Comunidad
de Madrid**

Integración de Blockchain

Control sobre arquitectura de la Microrred



- Sobre el circuito estandarizado de pruebas IEEE-123
- Compuesto por 5 Microrredes
- Gestión de las interconexiones entre Microrredes y con la red principal

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



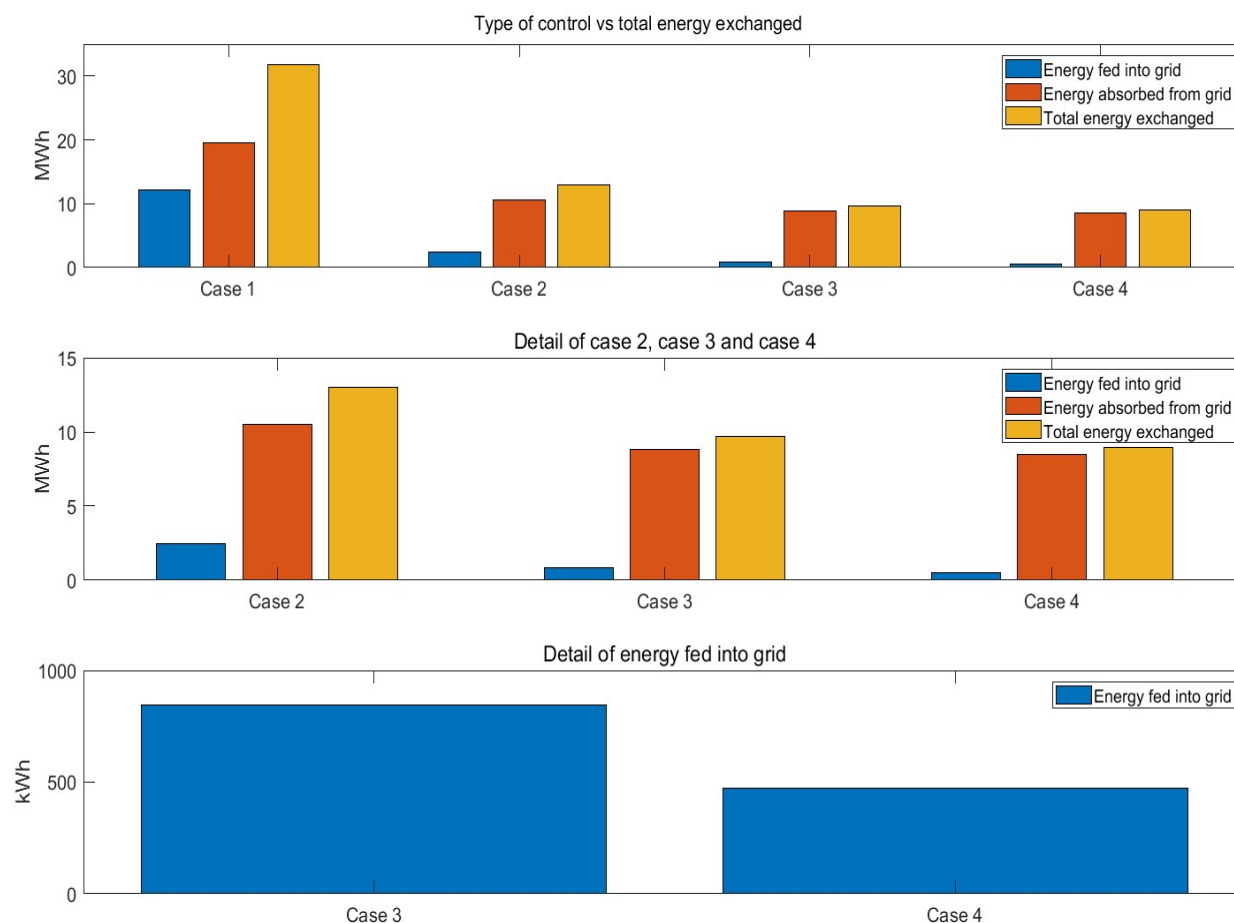
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



**Comunidad
de Madrid**

Integración de Blockchain

Resultados



- Reducción de los intercambios de energía con la red principal
- Reducción de pérdidas energéticas
- Niveles de voltaje y frecuencia dentro de márgenes en todo momento

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



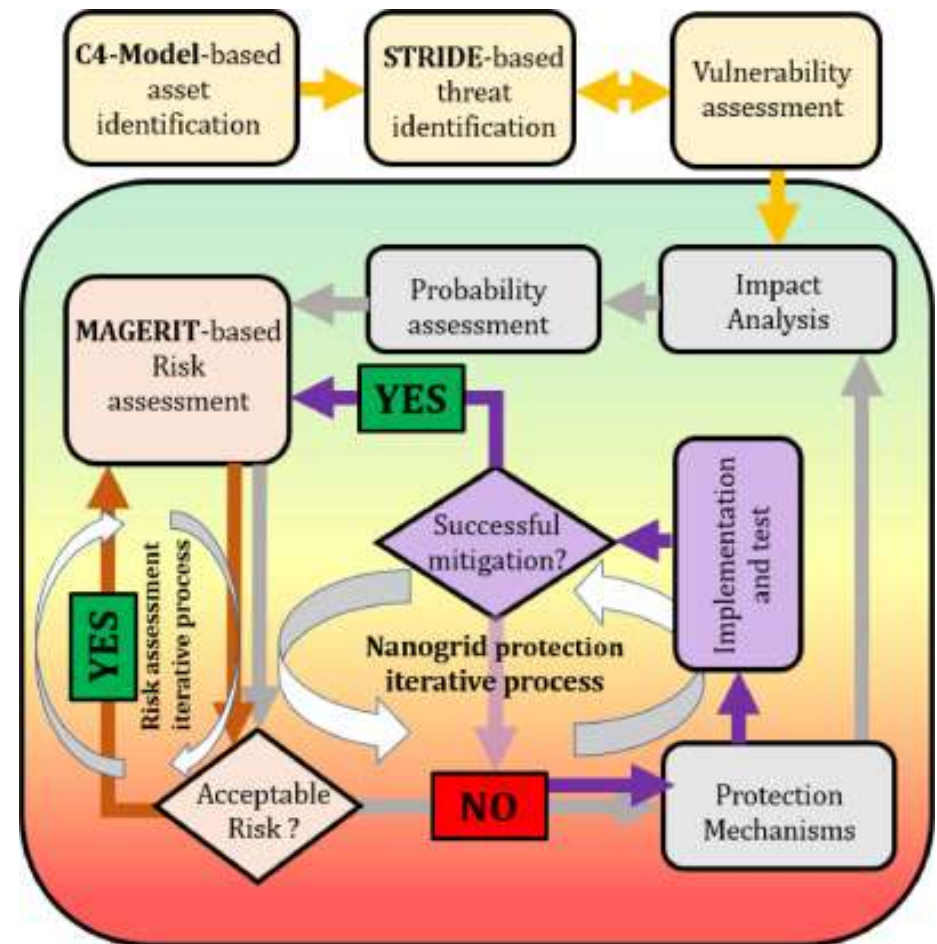
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Ciberseguridad

- Estudio de las principales amenazas de ciberseguridad que pueden afectar a las Smart grids y microrredes eléctricas.
 - Análisis de ciberseguridad de una microrred prototipo.
 - Identificación de activos con C4 Model.
 - Evaluación de amenazas con STRIDE.
- Cuantificación de riesgos con MAGERIT.
- Implementación de mecanismos de protección con el fin de mitigar las amenazas detectadas en el paso anterior.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

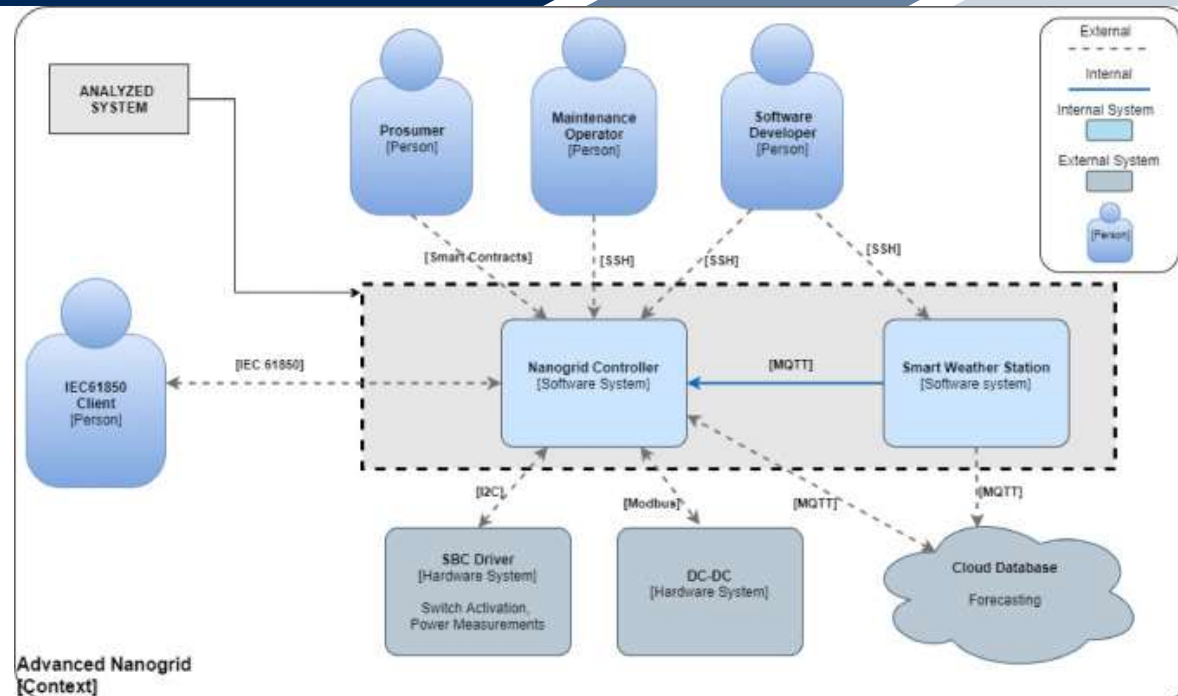


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Ciberseguridad: Modelado con C4 Model +STRIDE



- **C4 Model:**

- Una forma de modelado de software para que se pueda comunicar de un modo eficiente y efectivo al resto del equipo multidisciplinar.

- **STRIDE:**

- Spoofing -> Suplantación de Identidad de un usuario del sistema (Integridad, Confidencialidad y Disponibilidad)
- Tampering -> Modificación malintencionada de los datos del sistema (Integridad y Confidencialidad).
- Repudiation -> Negación de la ejecución de una acción (Integridad).
- Information Disclosure -> Acceso a información del sistema a usuarios que no deberían tenerlo (Confidencialidad).
- Denial of Service -> Denegación del servicio del sistema (Disponibilidad).

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Ciberseguridad: MAGERIT para cuantificación de riesgos.

- ❑ Impacto Total = [Impacto (Confidencialidad) + Impacto (Integridad) + Impacto (Disponibilidad)] / 3.
- ❑ Posibilidad: Se establece en función de la experiencia del especialista.
- ❑ Riesgo = Impacto x Posibilidad.

<i>riesgo</i>		<i>Impacto</i>				
		1	2	3	4	5
<i>Posibilidad</i>	5	M (5)	A (10)	A (15)	MA (20)	MA (25)
	4	B (4)	M (8)	A (12)	A (16)	MA (20)
	3	B (3)	M (6)	M (9)	A (12)	A (15)
	2	B (2)	B (4)	M (6)	M (8)	A (10)
	1	B (1)	B (2)	B (3)	B (4)	M (5)

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

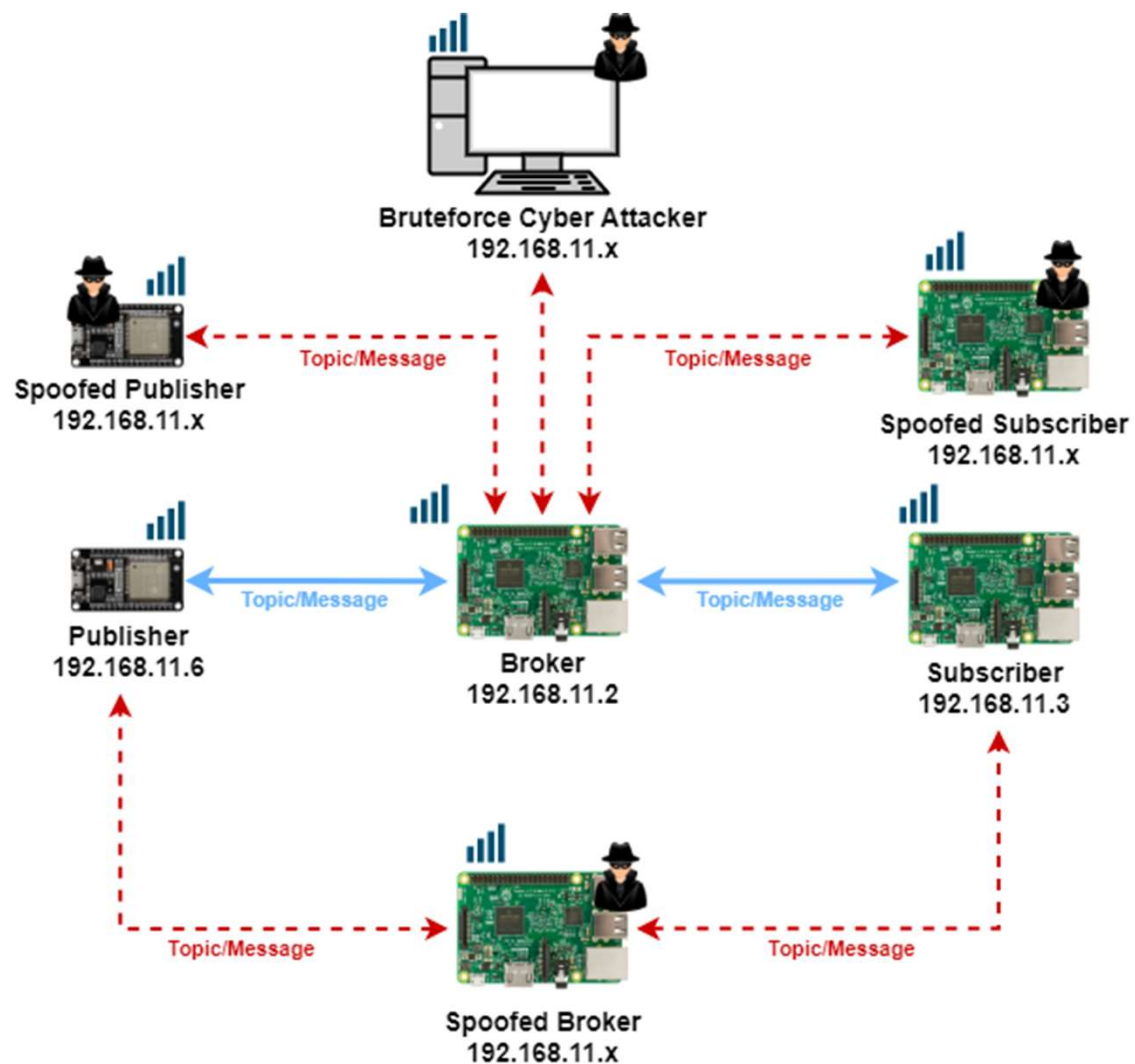
UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Ciberseguridad: entorno de pruebas



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Ciberseguridad: MAGERIT para cuantificación de riesgos.

Código Amenaza	Activo	Amenazas STRIDE	Código MAGERIT	I	C	D	Impacto
16	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Spoofing	[A.5]	5	5	5	5
17	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Tampering	[A.15]	5	3	1	3
18	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Information Disclosure	[A.14]	3	5	1	3

Código Amenaza	Activo	Amenazas STRIDE	Código MAGERIT	I	P	Riesgo	Posibles Mitigación	Riesgo Residual
16	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Spoofing	[A.5]	5	3	15	Control de acceso mediante roles	4
17	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Tampering	[A.15]	3	4	12	Encriptar comunicación	2
18	Comunicación Wifi MQTT de FreeRTOS hacia Broker MQTT	Information Disclosure	[A.14]	3	4	12	Encriptar comunicación	2

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



**Comunidad
de Madrid**

Mejoras de seguridad

- Cifrado de mensajes GOOSE y MQTT

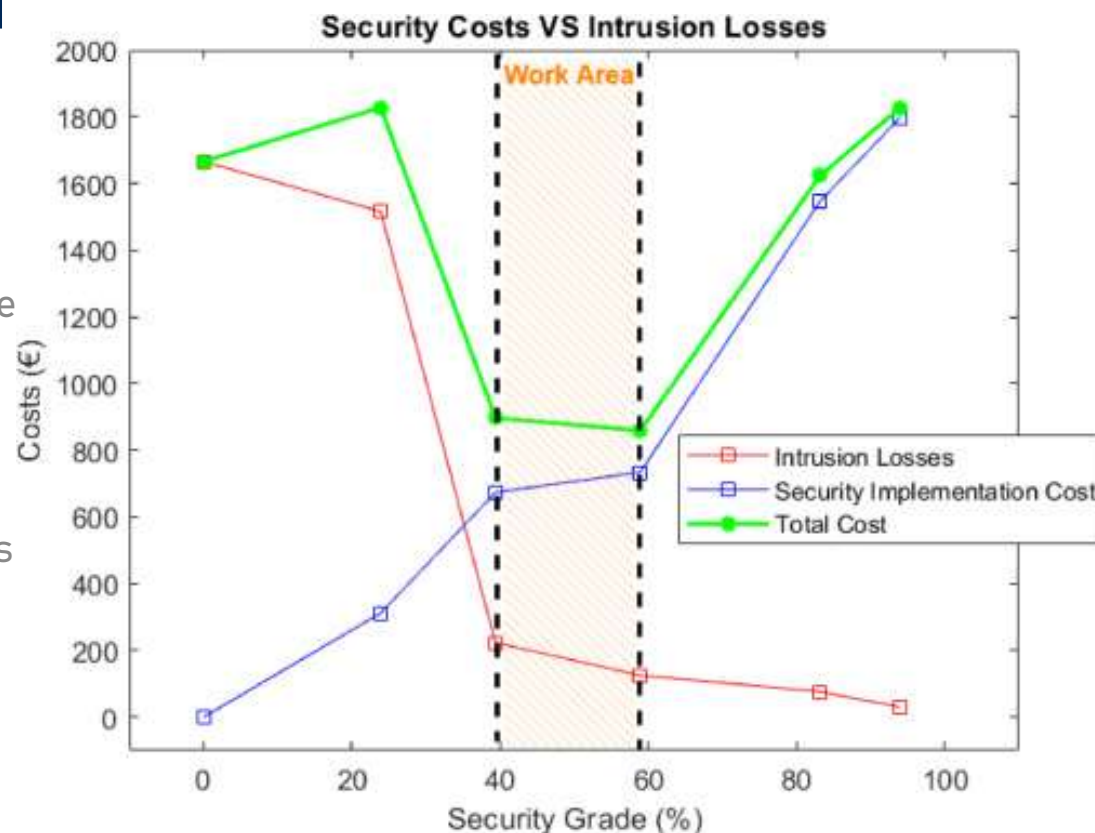
- Requerimientos muy estrictos de latencia.
- No tienen implementada seguridad
- Hemos realizado pruebas con diferentes métodos de cifrado.
- El único que ha cumplido con los tiempos de latencia requeridos es el cifrado AES.

- Tecnología Blockchain

- Asegura inmutabilidad de los datos
- Permite disponibilidad de datos en todos los nodos
- Implementado en un dispositivo de bajo coste y bajo consumo.

- Detector de intrusiones

- Análisis el tráfico con WireShark.
- Empleo de Suricata para detectar y rechazar los ataques.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Publicaciones

- En preparación:

Applied Energy: *"Design and Implementation of Multiprotocol Framework for Residential Prosumer Incorporation in Flexibility Markets "*

- Applied Energy:

"Aperiodic two-layer energy management system for community microgrids based on blockchain strategy" DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119847>

- Internet of Things:

"Addressing the cybersecurity vulnerabilities of advanced nanogrids: A practical framework" DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100620>

- IEEE Access special section **"KEY ENABLING TECHNOLOGIES FOR PROSUMER ENERGY MANAGEMENT"**:

"Addressing Challenges in Prosumer-Based Microgrids With Blockchain and an IEC 61850-Based Communication Scheme"

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036340>

- Sensors special section **"Intelligent Sensors"**:

Turning Base Transceiver Stations into Scalable and Controllable DC Microgrids Based on a Smart Sensing Strategy

DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041202>

- IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)

"Integration of Blockchain with IEC 61850 for Internal Management of Microgrids" DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE45063.2020.9152542>

- IEEE International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)

"Assessing Microgrid Communications Technologies in Real-World Environment" DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9873455>

"Addressing cybersecurity threats in prosumer-based nanogrids with MQTT communication" DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9872918>

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



MUCHAS GRACIAS

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

