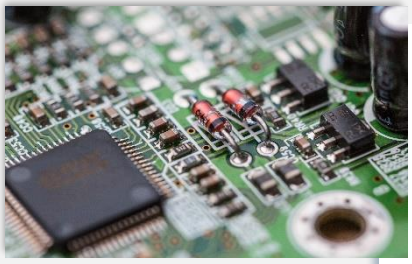


PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

Diseño y simulación de la capa de comunicaciones para sistemas eléctricos distribuidos

Universidad de Alcalá

22 de septiembre de 2021

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
- Caso de uso
- Integración de blockchain
- Mejoras de seguridad
- Publicaciones

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

Mensajes en Microrredes

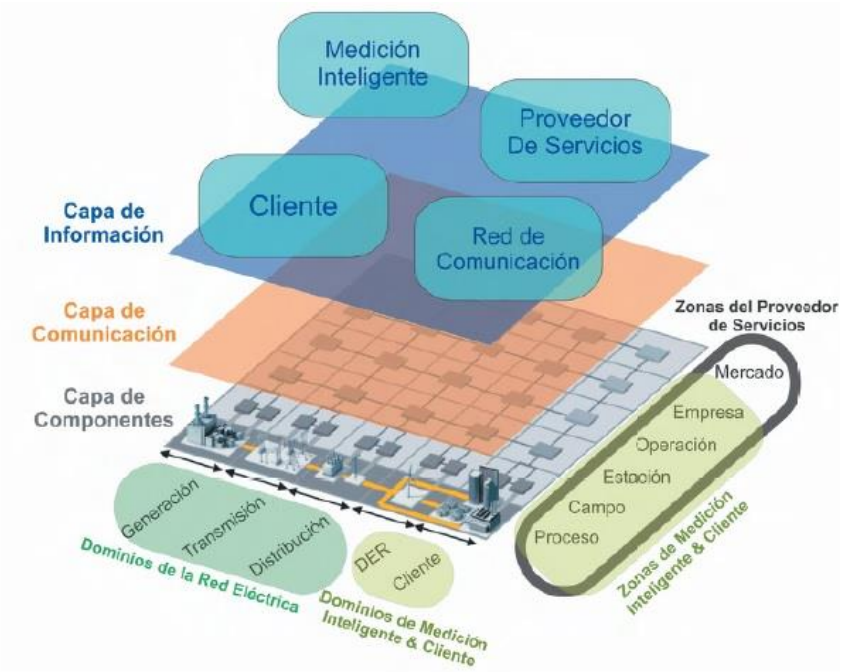


Figura 3. Relación dominios del modelo conceptual FG-Smart y la capa de componentes de SGAM

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.

Mensajes en Microrredes

Requerimientos de aplicaciones

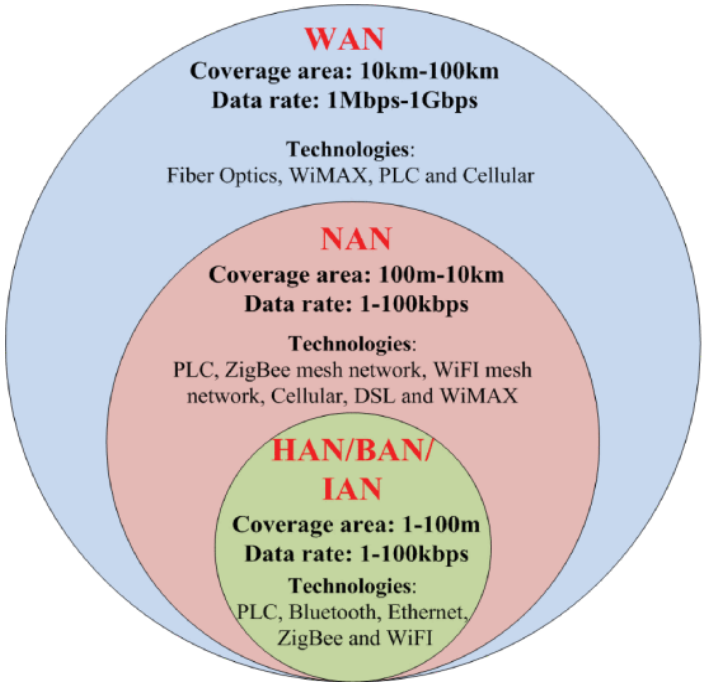
Aplicación	Tamaño típico de datos (bytes)	Latencia	Fiabilidad (%)
Lectura de contadores	100 - 2400	15 s – 4 h	> 98
Precio	100	< 1 min	> 98
Respuesta a la demanda	100	< 1 min	> 99,5
Operación del elemento de corte	25	< 1 min	> 98
Automatización de la distribución	100 - 1000	< 5 s	> 99,5
Restauración de 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

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

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

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

Resultados pruebas reales

Alternativas válidas para aplicaciones menos exigentes:

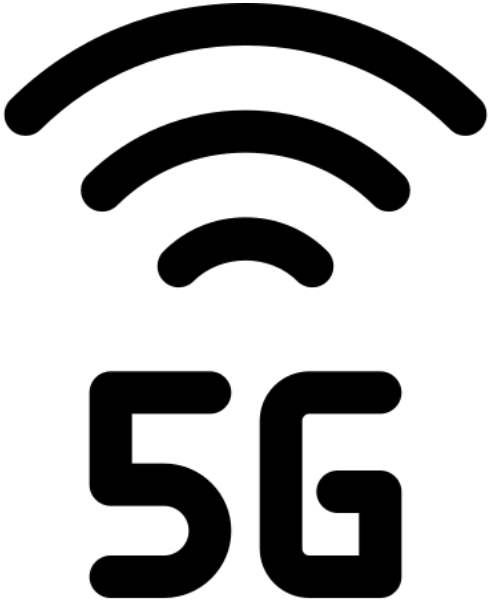
- Rango bajo: **Bluetooth y Wi-Fi 6**
  - Inconvenientes:
    - Rango: Bluetooth 40 m, WiFi 70 m
    - Latencia. Bluetooth: 90 ms – 1 s, Wi-Fi: 2 – 130 ms
- Rango medio: **LoRa**
  - Inconvenientes:
    - Alcance < 500 metros
    - Latencia elevada > 100 ms
    - Latencia para máximo alcance: 1,8 s
    - Baja fiabilidad.
- Gran rango: **Móvil (4G)**
  - Inconvenientes
    - Latencia: 30 – 100 ms
    - Coste por servicio
    - Dependencia de empresa de telecomunicaciones

Bluetooth 5.0

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



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

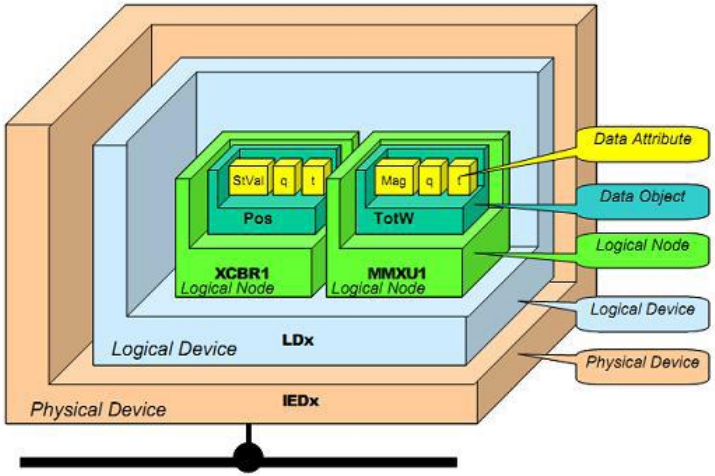
Se basa en tres principios:

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.

Estandarización de comunicaciones

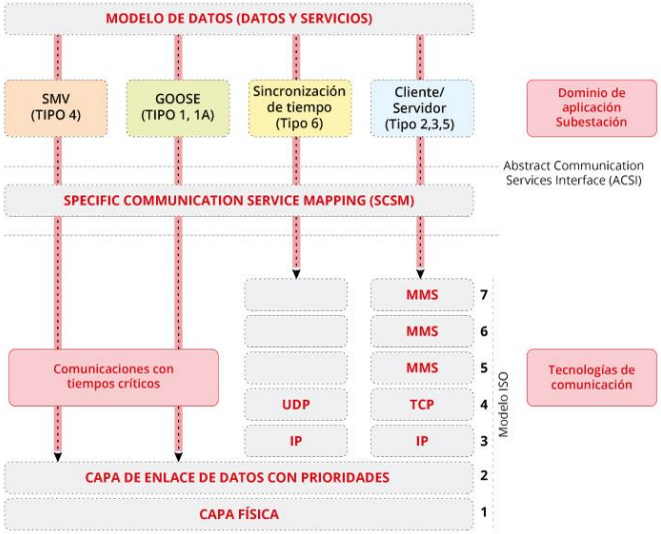
- **Dispositivo físico**
- **Dispositivo lógico.** Organiza información de cada dispositivo físico p. ej. control, protección, información, etc. Los nombres son libres.
- **Nodo lógico.** Funciones o componentes de automatización del sistema. Se identifican con 4 letras. Se encuentran definidos en la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



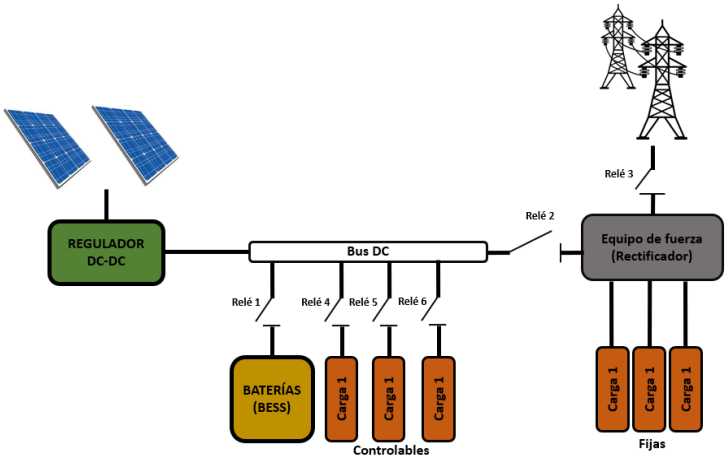
Estandarización de comunicaciones

Distintos protocolos según la información a transmitir

- **Sampled Measured Values. C**omunicación 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.

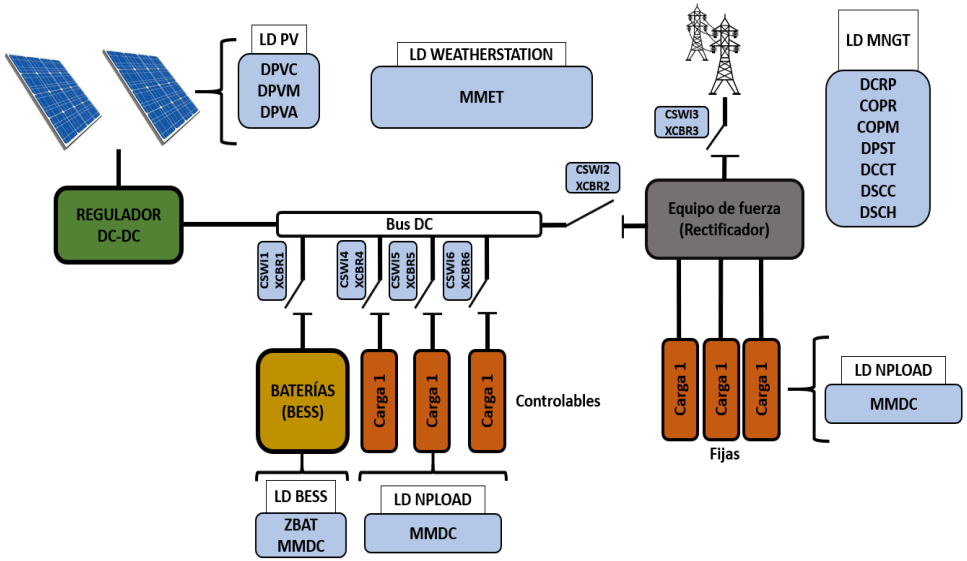


Caso de uso



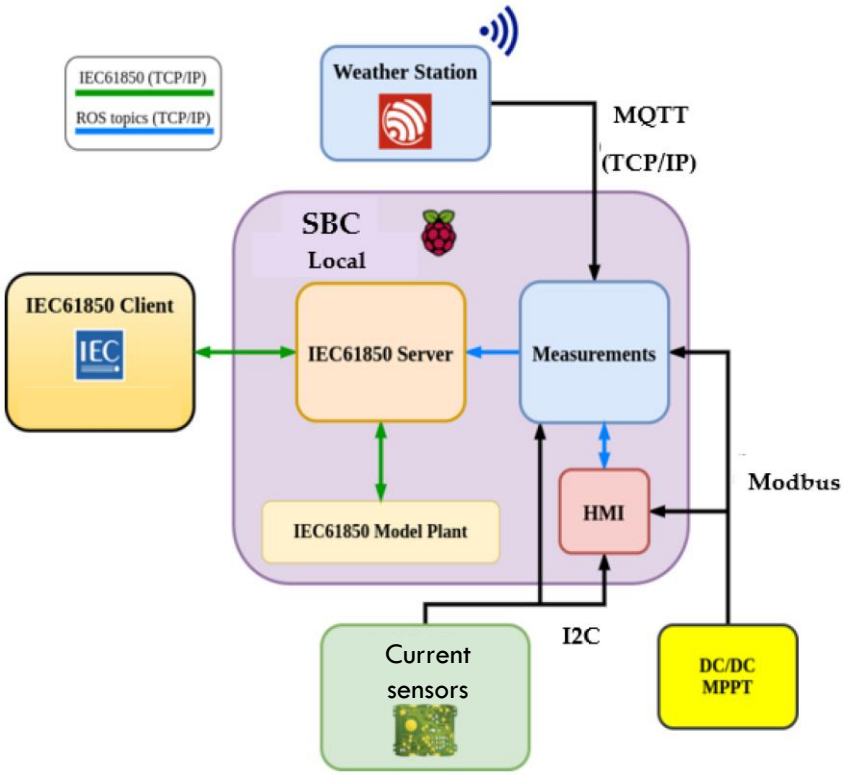
- Instalación de fotovoltaica
- Simula un nodo de una microrred
- Capacidad de almacenamiento de energía en batería
- Cargas controlables
- Posibilidad de conexión y desconexión de la red principal

Caso de uso



- Es difícil encontrar dispositivos comerciales con el estándar IEC 61850
- Cada elemento tiene sus propios protocolos.
- Raspberry Pi como conversor de protocolos.
- Hemos creado un modelo de la planta con elementos del estándar

Caso de uso



- Modelo de la planta en la Raspberry Pi
- El cliente IEC 61850 únicamente debe comunicarse con el servidor IEC 61850.
- MQTT para comunicarse con la estación meteorológica.
- Modbus con regulador DC-DC
- I2C con los sensores de corriente

Caso de uso

ZRGL class				
Data object name	**Common data class**	**Explanation**	**T**	**M/O/C**
LNName		Shall be inherited from logical-node class (see IEC 61850-7-2)		
Data				
System logical node data				
		LN shall inhert all mandatory data from common logical node class		M
		Data from LLN0 may optionally be used		O
WRtg	ASG	Maximum power rating		M
IsoTyp	ENG	Type of isolation: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – Power frequency transformer isolated 2 – Hi frequency transformer isolated 3 – Non-isolated, grounded 4 – Non-isolated, isolated DC source 99 – Other		M
VRegTyp	ENG	Type of voltage regulation: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – Regulated output: fixed voltage 2 – Regulated output: variable voltage 3 – Filtered output: load dependant 4 – Unregulated and unfiltered 99 – Other		M
ConvTyp	ENG	Conversion type: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – Boost 2 – Reducer 3 – Boost-reducer 99 – Other		O
CoolTyp	ENG	Type of cooling method: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – Passive air cooling (heatsink) 2 – Forced air cooling (fan + heatsink) 3 – Fluid cooling (water) 4 – Heat pipe 99 – Other		O
Status information				
GridModSt	ENG	Current connect mode: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – Disconnected 2 – Power not delivered 3 – Power delivered 99 – Other		O
OutFilTyp	ENG	Output filter type: Value – Explanation 0 – Not applicable / Unknown 1 – None 2 – Series filter (L) 3 – Parallel filter (LC) 4 – Series-Parallel (LCL) 99 – Other		O
Stdby	SPS	Regulator stand-by status - True: stand-by active		O
CurLev	SPS	DC current level available for operation - True: sufficient current		O
SwHz	ASG	Nominal frecuency of switching		O
Settings				
OutWSet	ASG	Output power setpoint		O
InALim	ASG	Input current limit		O
InVLim	ASG	Input voltage limit		O
OutVSet	ASG	Output voltage setpoint		O
OutALim	ASG	Output current limit		O
Measured values				
HeatSinkTmp	MV	Heat sink termperature: Alarm if over max		O
EnclTmp	MV	Enclosure temperature		O
AmbAirTemp	MV	Ambient outside air temperature		O
FanSpdVal	MV	Measured fan speed: Tach or vane		O

- Existen nodos lógicos para rectificador e inversor, pero no para regulador DC-DC.
- Hemos modelado un nuevo nodo lógico que contiene toda la información necesaria.

Caso de uso

```
INFORME DEL ESTADO DE LA PLANTA HELIOS:

Modo LD_MNGT (1): ON
|----> Modo LD_MNGT_LN_DCRP (1): ON
|        |----> DO PlntObSelf: Próposito/Obligación en el ECP: Funcionamiento de forma pasiva (siempre que sea posible FV
|        |----> DO PlntOblBck: Próposito/Obligación en el ECP: No funciona como BackUp
|---->Modo LD_MNGT_LN_DOPR (1): ON
|        |----> DO ECPType: Conexión de una única DER a una cargo local,        q: QUALITY_VALIDITY_GOOD
|---->Modo LD_MNGT_LN_DOPM (1): ON
|---->Modo LD_MNGT_LN_DPST (1): ON
|        |----> DO ECPConn: No conectado eléctricamente al ECP,    0    q: QUALITY_VALIDITY_GOOD
|---->Modo LD_MNGT_LN_DSCC (1): ON
|---->Modo LD_MNGT_LN_DSCH (1): ON
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR1 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR1 (BATERIAS): OFF
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR2 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR2 (RECTIFICADOR): OFF
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR3 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR3 (RED): OFF
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR4 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR4 (CARGAS_NC1): OFF
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR5 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR5 (CARGAS_NC2): OFF
|---->Modo LD_MNGT_LN_XCBR6 (1): ON
|        |----> DO Pos: Posicion del interruptor XCBR6 (CARGAS_NC3): OFF

Modo LD_PV (1): ON
|---->Modo LD_MNGT_LN_DPVM (1): ON
|        |----> DO MdulCfgTyp: Tipo de configuración del módulo PV: Concentrado
|        |----> DO MdulWRtg: potencia nominal en vatios pico STC: 330.00 (Pmax/W)
|        |----> DO MaxMdulV: Voltaje del módulo a máxima potenica en STC: 37.70 (Vmpp/V)
|        |----> DO MaxMdulA: Corriente del módulo a máxima potenica en STC: 8.76 (Impp/A)
|        |----> DO MdulOpnCctV: Voltaje del módulo en circuito abierto: 45.90 (Vcc/V)
|        |----> DO MdulSrtCctA: Corriente del módulo en cortocircuito: 9.27 (Isc/A)
|        |----> DO MdulWTmpDrt: % de reducción de la potencia en función de la Tª: -0.40 %
|        |----> DO MdulATmpDrt: % de reducción de la corriente en función de la Tª: 0.06 %
|        |----> DO MdulVTmpDrt: % de reducción de la tensión en función de la Tª: -0.31 %
|---->Modo LD_MNGT_LN_DPVA (1): ON
|        |----> DO Typ: Tipo de configuración del módulo PV: Planta
|        |----> DO MdulCnt: Números de módulos por serie: 11
|        |----> DO StrgCnt: Números de series en paralelo por sub-matriz: 1
|        |----> DO SubArrCnt: Número de sub-matrices en paralelo por matriz: 3
|        |----> DO GrndConn: Tipo de conexión a tierra: Puesta a tierra positiva
|        |----> DO ArrWRtg: Potencia nominal del array (Wp): 3633.00 Wp
|---->Modo LD_MNGT_LN_DPVC (1): ON
|        |----> DO ArrModCtr: Modo seleccionado para el control de la potencia de salida de la matriz: Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)
|---->Modo LD_MNGT_LN_MMDC (1): ON
|        |----> DO Watt: Potencia medida en PV: 3006.00 V
|        |----> DO Amp: Corriente medida en PV: 0.00 V
|        |----> DO Vol: Voltaje medido en PV: 48.00 V
```

- Uso de la consola del PC para leer el modelo de la planta.
- El modelo se muestra siempre actualizado.
- Se pueden enviar comandos para actuar sobre la planta.

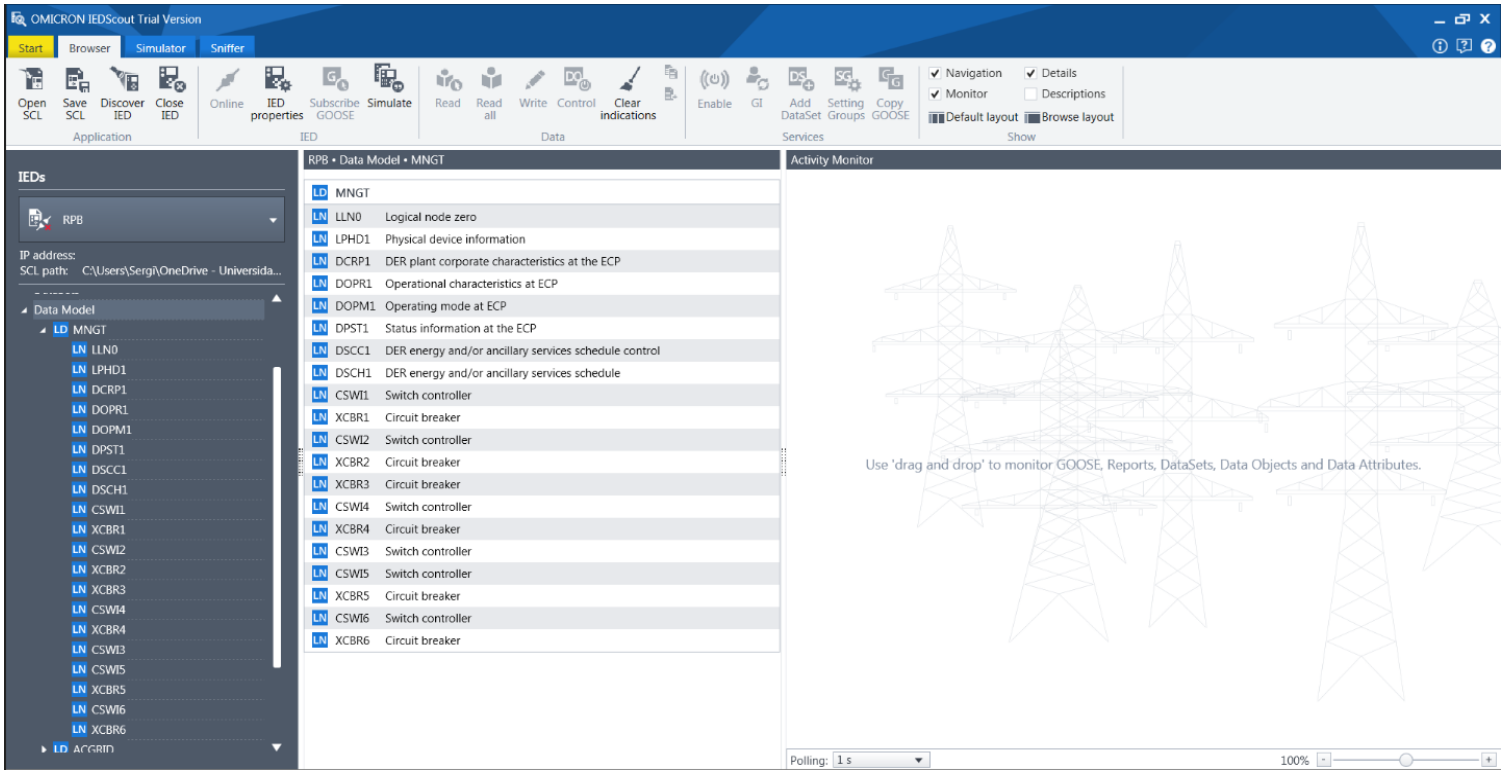
UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro
Comunidad de Madrid

Caso de uso

Interfaz gráfica para facilitar su uso

Caso de uso

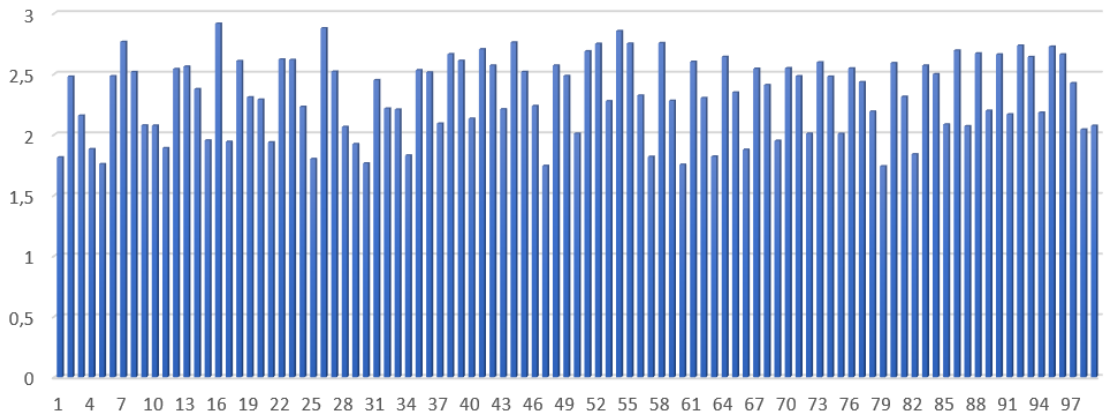
Cliente comercial



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro
Comunidad de Madrid

Caso de uso

Análisis de tiempos



Media: 2,324 ms

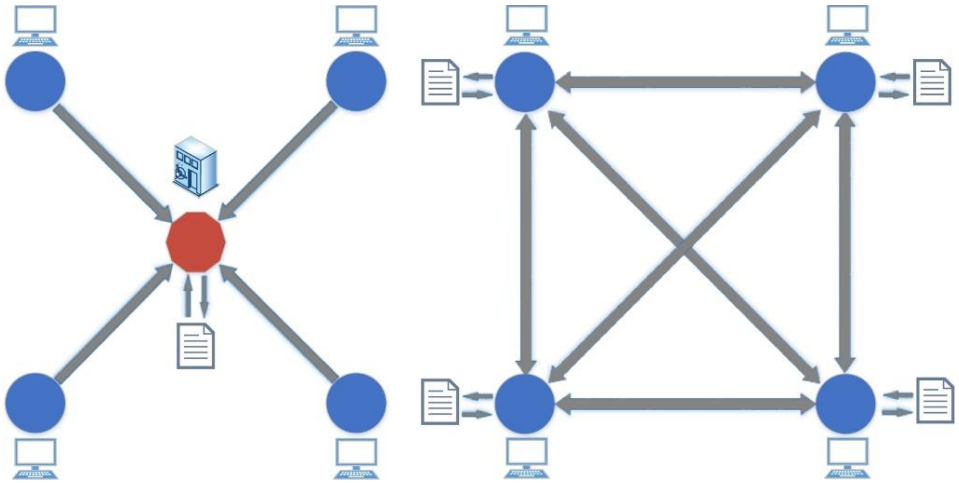
Mínimo: 1,739 ms

Máximo: 2,915 ms

- Prueba con 100 mensajes GOOSE consecutivos por cable Ethernet
- Todos por debajo de los 3 ms
- Ninguna otra de las tecnologías físicas analizadas sería válida

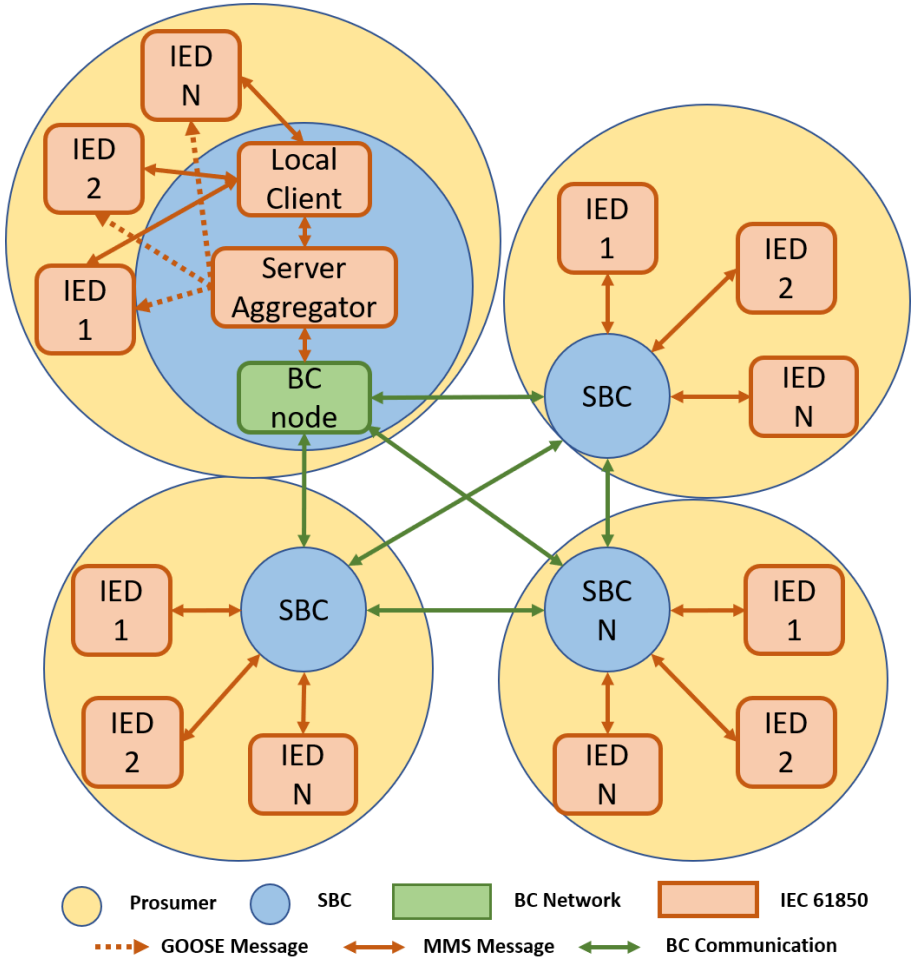
Integración de Blockchain

- **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



Integración de Blockchain

Propuesta de arquitectura de comunicaciones

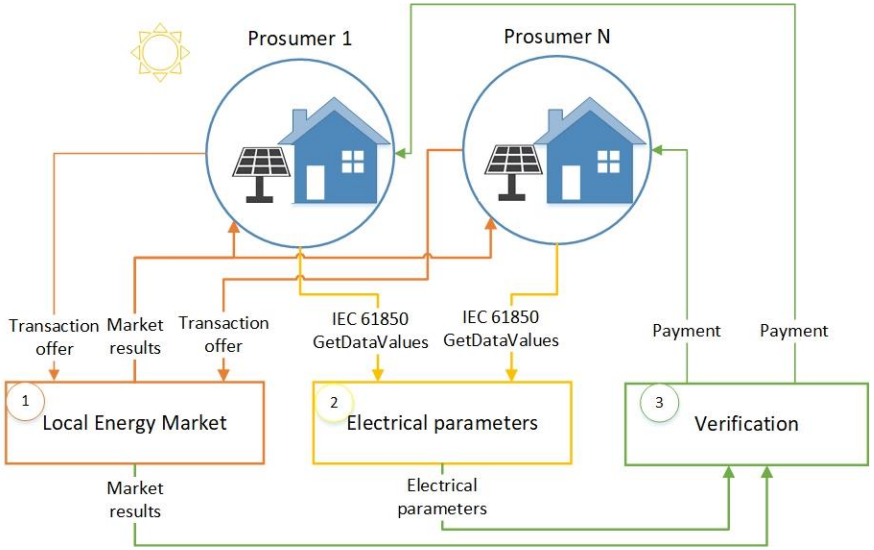


- Cada prosumidor tiene sus IEDs compatibles con el estándar IEC 61850
- Se añade un ordenador de placa simple a su instalación
- Incorpora un nodo Blockchain que se comunica con el resto de nodos de la red

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro
Comunidad de Madrid

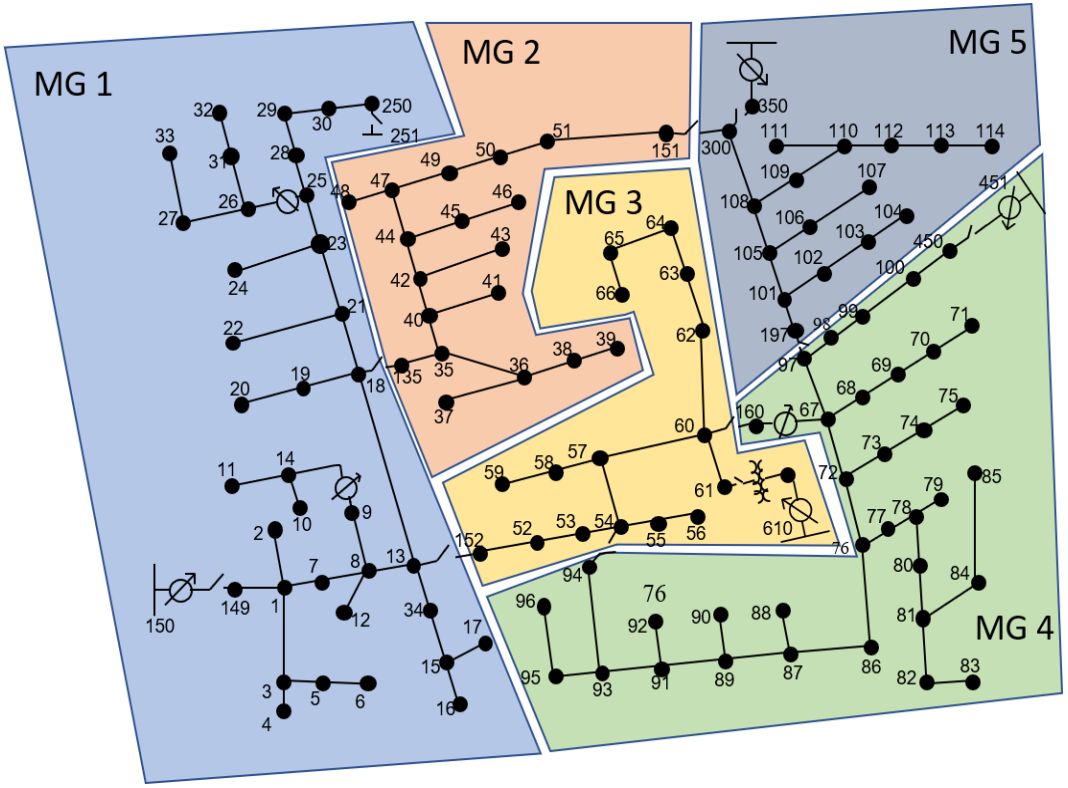
Integración de Blockchain

- **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



Integración de Blockchain

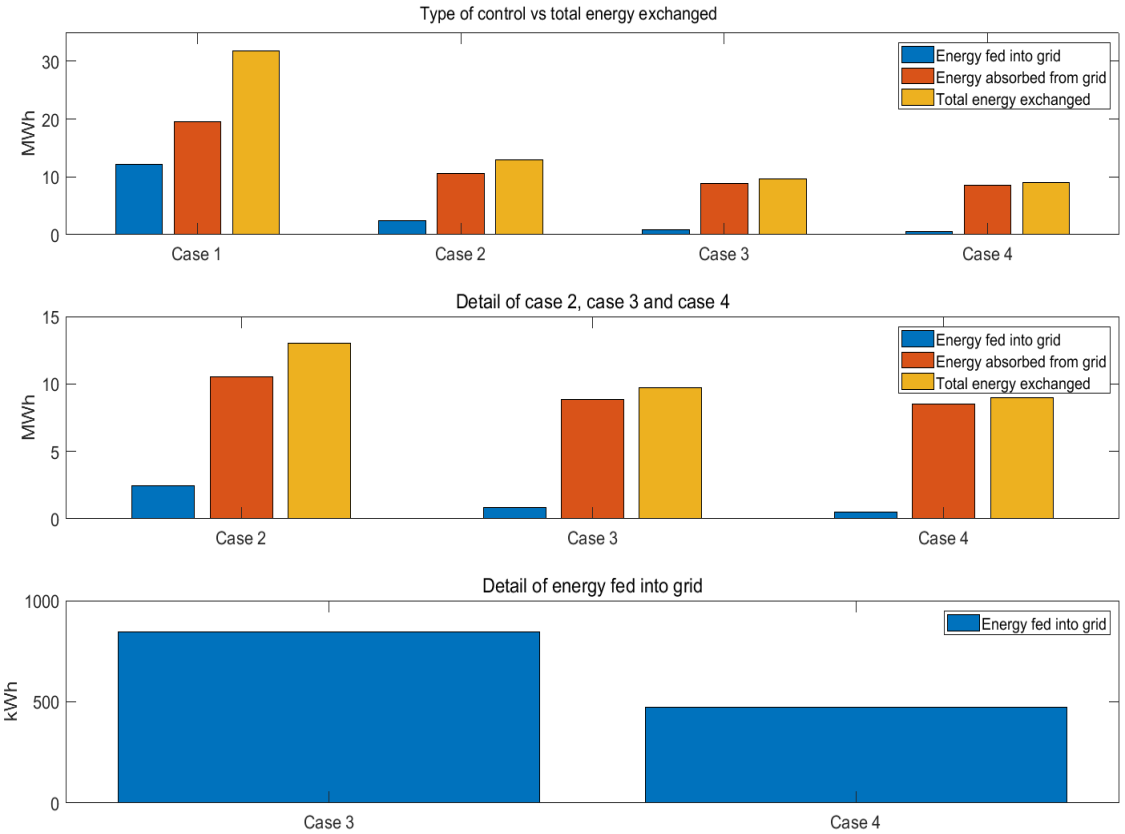
Control sobre arquitectura de la Microrred



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

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

Mejoras de seguridad

- Cifrado de mensajes GOOSE y SMV (IEC 61850)
  - 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.

Publicaciones

- 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 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

MUCHAS GRACIAS