

# Nodos P2P para el Control y Monitorización de Microrredes Inteligentes: Diseño, Desarrollo e Implementación

S. Marzal, *silmarro@teleco.upv.es*, E. Figueres, *efiguere@eln.upv.es*,  
G. Garcerá, *ggarcera@eln.upv.es*, y R. Salas, *roberts@ula.ve*.

**Resumen**—Desde el punto de vista tecnológico las infraestructuras, tecnologías y protocolos de comunicación son esenciales en el despliegue de microrredes inteligentes para garantizar la estabilidad, así como un funcionamiento óptimo y fiable. En particular, se presenta el diseño de una arquitectura de comunicación descentralizada basada en nodos P2P que permite implementar de manera segura y fiable los niveles de control jerárquico más elevados para la optimización de flujos de potencia en la propia microrred. Una primera implementación se realiza y se discuten los primeros resultados.

**Index Terms**—Microrred Inteligente, nodos P2P, Sistemas Multi-Agente, Sistemas y Protocolos de Comunicación en Microrredes.



## 1. INTRODUCTION

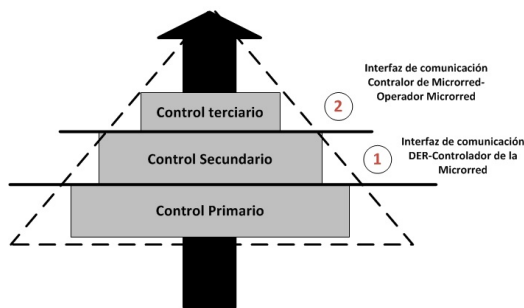
LA estructura básica de la red eléctrica actual se ha mantenido sin cambios, vertical en su operación (generación-transmisión-distribución) y con flujos de potencia unidireccionales [1]. Sin embargo, en los últimos años la creciente aparición en el sector energético de sistemas de generación distribuida (en su mayoría renovables) está produciendo cambios significativos en la estructura de la red eléctrica [2]. En este contexto, ha despertado un gran interés la investigación sobre microrredes inteligentes [1], redes eléctricas integradas, las cuales presentan un gran potencial para facilitar la integración de la generación distribuida de energía eléctrica [2], [3] hacia una alternativa más activa, flexible, eficiente y ecológica, al considerar un conjunto de unidades de generación, almacenamiento y de cargas (consumos domésticos o vehículos eléctricos), de-

nominados recursos energéticos distribuidos—DERs (*Distributed Energy Resources*) como un ente autónomo, capaz de funcionar en modo isla (desconectado de la red eléctrica principal) o conectado a una red de distribución [4], [5]. La efectiva integración de los DERs a la red eléctrica implica una transformación de la red donde el sistema de control debe estar fuertemente acoplado con la infraestructura de comunicación ya que ésta debe permitir el intercambio fiable de datos/órdenes a tiempo real que permitan administrar potencia eficientemente en los distintos modos de operación. Por tanto, este trabajo se centra en los aspectos TIC (tecnologías de información y comunicación) del despliegue de las microrredes inteligentes. En concreto se propone una arquitectura de comunicación descentralizada basada en sistemas multi-agente con nodos de comunicación P2P (*Peer-to-Peer*); una nueva generación de nodos capaces de proporcionar servicios inteligentes, mejorar el rendimiento, y proporcionar mayor disponibilidad, fiabilidad y escalabilidad a la microrred.

- S. Marzal pertenece al Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales, GSEI de la UPV.E-mail: *silmarro@teleco.upv.es*
- E. Figueres, G. Garcerá y R. Salas pertenecen al GSEI, de la UPV.

## 2. CONTROL JERÁRQUICO DE MICRORREDES

En una microrred se pueden definir las tareas de control en tres grupos jerarquizados (Figura 1): Control terciario o control del lado del operador (*Distribution and Market Network Controller*), control secundario o control del lado de la red [(Microgrid Central Controller, MGCC) y control primario o control del lado del recurso energético distribuido (*Local Control, LC*).



**Figura 1:** Arquitectura Generalizada Jerárquica del Control de una Microrred

Actualmente para implementar este esquema jerárquico se utilizan arquitecturas de control centralizadas, donde el controlador central se comunica con todos los recursos de la microrred y toma decisiones. Sin embargo, el control inteligente de la microrred presenta numerosos retos. En concreto es necesario el seguimiento de cada uno de los activos presentes en ella para mantener su estabilidad, es decir, conseguir un balance óptimo entre generación, demanda y almacenamiento energético y, que además, éstos reaccionen con rapidez ante los cambios. Ello significa, ser capaces de controlar parámetros de interés tales como: voltajes, fases y frecuencias, valores de pico, potencias, armónicos, entre otros; de los distintos DERs presentes en la microrred. En consecuencia, las estrategias de control se están moviendo desde un sistema de control centralizado hacia uno descentralizado que permita una monitorización y seguimiento individual de cada uno de los recursos presentes en la red con el fin de mejorar la fiabilidad y estabilidad de la microrred.

## 3. CONCEPTO P2P PARA MICRORREDES CON CONTROL DISTRIBUIDO

El esquema de control centralizado jerárquico presentado en la Figura 1 puede ser implementado empleando una arquitectura descentralizada. En los últimos años, los sistemas multi-agente (*Multi-Agent Systems, MAS*) han surgido como tecnología competitiva para la implementación de estrategias de control descentralizadas [6], [7]. En esta estructura cada unidad DER es considerado como un agente. Un agente es un sistema informático capaz de realizar tareas de forma autónoma y con capacidades de comunicación para intercambio de datos entre sus vecinos que permite la solución de problemas a través de la cooperación, coordinación y negociación.

La arquitectura MAS añade redundancia en el sistema lo que mejora la robustez y tolerancia a fallos, ayuda a obtener un rendimiento de alta velocidad y permite la toma de decisiones de manera autónoma, lo que lleva a un control eficiente en un esquema sensible al tiempo y oferta capacidades de *Plug and Play* lo que permite la flexibilidad para una futura expansión. Sin embargo, las arquitecturas descentralizadas basadas en MAS pueden no ser capaces de utilizar en su totalidad las propiedades de colaboración, competencia y capacidades de consenso, entre otras funcionalidades avanzadas ofrecidas por el MAS; en otras palabras, no pueden comunicarse simultáneamente con otros agentes, solamente se permiten interacciones uno-a-uno entre agentes individuales [8]. La ausencia de esta funcionalidad resulta en una asignación y gestión de recursos de manera sub-óptima. Para resolver estos problemas, las comunicaciones P2P, un novedoso paradigma para sistemas distribuidos, están emergiendo [9], [10] permitiendo la interacción entre dos o más pares.

El modelo de conectividad P2P es un modelo de comunicación para sistemas distribuidos donde los nodos pares pueden actuar en el sistema de forma simétrica tanto como clientes como servidores, lo que difiere del paradigma cliente-servidor tradicional. En el modelo P2P se crean redes virtuales a nivel de aplicación so-

bre la infraestructura de Internet. Los nodos en la red son llamados pares, y cada nodo puede iniciar la comunicación, ser objeto o sujeto de ésta, es decir, ser proactivo. Como desventaja se tiene que los pares ingresan y salen de la red con alta frecuencia, por lo que la red es de naturaleza dinámica, lo que impone restricciones a nivel de control, dado que la red debe ser robusta para soportar estas fluctuaciones. Sobre la base de aplicación de estos mecanismos, la arquitectura de las redes P2P se puede clasificar en función del grado de descentralización, en redes P2P puras, mixtas e híbridas.

Recientes investigaciones han mostrado el potencial de la utilización de nodos P2P en arquitecturas distribuidas basadas en MAS [11]. De hecho, los esfuerzos por integrar los MAS con arquitecturas P2P plantea oportunidades prometedoras, ya que la combinación de éstos parece la solución perfecta para la realización de un control descentralizado en microrredes, debido a que, mientras que la infraestructura de redes P2P proporciona un mejor rendimiento, escalabilidad, disponibilidad y propiedades reactivas y activas a los nodos, necesario para el desarrollo de un control eficaz y fiable, el MAS permite realizar una red autónoma, social y comunicativa, que hacen posible un desarrollo de una arquitectura inteligente y flexible en entornos dinámicos y adaptativos [12], [13], como es una microrred.

## **4. ARQUITECTURA DE COMUNICACION P2P PARA MICRORREDES INTELIGENTES**

Con el fin de conseguir los beneficios presentados por la conjunción de los sistemas MAS-P2P, en esta sección se presenta una visión general de la arquitectura de comunicación propuesta (Figura 2). Se trata de una arquitectura distribuida basada en nodos agente con comunicaciones P2P de topología híbrida en la que un nodo central (Gestor de la Microrred) es el encargado de controlar y coordinar todos los nodo-DERs (Agentes del controlador local). A continuación se proporciona una descripción de cada componente.

### **4.1. Gestor de la Microrred**

Este sistema es el encargado de controlar y coordinar todos los agentes presentes en la microrred según sea su tipología (carga, almacenamiento o generador), así como rutear todos los mensajes de control de la red a los distintos agentes.

La pila de protocolos definida para el gestor de la microrred sigue el modelo TCP/IP. La arquitectura propuesta define dos niveles o capas software para la implementación de servicios basados en redes P2P. Una capa que brinda los servicios de red P2P, que toma servicio de la capa de transporte (dado que el modelo opera bajo la suite de protocolos TCP/IP), cuyo objetivo es propagar mensajes y permitir que los dispositivos energéticos accedan a la red, y una capa de aplicación, que toma servicio de la red P2P, que implementa los servicios de procesamiento distribuido, monitorización de datos y gestión de eventos (conexiones, desconexiones, alarmas, etc.) a través del desarrollo y gestión de una base de datos. Las acciones que va a realizar el nodo gestor de la microrred son: Mantener y actualizar un registro de nodos/agentes (clientes) conectados en la base de datos, servir el registro de clientes de la aplicación para facilitar las tareas de control y monitorización, gestionar conexión y desconexión de cada uno de los nodo-agente, monitorizar parámetros de funcionamiento de cada uno de los nodo-agente, administrar y tramitar eventos sucedidos en la microrred, atender alarmas que puedan ocurrir en los diferentes nodos y negociar las comunicaciones entre los pares.

### **4.2. Base de datos**

Este es el repositorio utilizado por el gestor de microrred para almacenar datos sobre el contexto (conexiones, desconexiones, eventos) y estatus (parámetros de funcionamiento) de cada uno de los nodo-agente como medio para mantener la estabilidad de la microrred. Se trata de una base de datos con un modelo relacional, la cual permite establecer interconexiones (relaciones), entre los datos que están guardados en las tablas, y a través de dichas conexiones

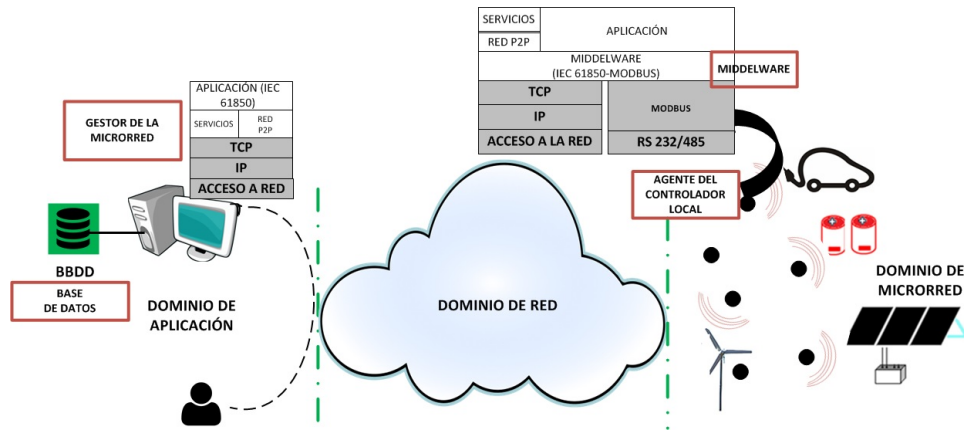


Figura 2: Diagrama Básico de la Solución Diseñada

relacionar los datos de las tablas interconectadas. Para administrar y desarrollar la aplicación de la base de datos creada se ha desarrollado un Sistema Gestor de Bases de Datos (SGBD), de modo que se han utilizado herramientas computacionales para acceder a los datos de forma que se puedan almacenar, recuperar y gestionar la información de forma práctica y eficiente.

#### 4.3. Agente del controlador local

En una microrred se tienen múltiples dispositivos que, en caso de generadores y fuentes de almacenamiento, están conectados a través de inversores que realizan la función del control primario. En base a la arquitectura de red diseñada, el nodo P2P será capaz por un lado, interactuar con la red TCP/IP para envío y recepción de mensajes por parte tanto del gestor de la microrred como de los agentes vecinos, y por otro lado interactuar con el inversor para lectura y/o modificación de parámetros funcionales del inversor en función de las consignas recibidas por el gestor de la microrred. La pila de protocolos definida para el agente del controlador local implementa en sus niveles bajos los protocolos propios para permitir ambos accesos TCP y Modbus.

Por otro lado, el software añade una capa de abstracción para las aplicaciones que brinda los servicios de red P2P y va a permitir a la aplicación gestor de la microrred acceder al nodo-agente a la vez que le permitirá al nodo-

agente ser reactivo y conferirle la característica PnP (*plug and play*), esto es la capacidad de adición/eliminación de éste a la red sin ninguna modificación importante del sistema, así como que al añadirse pueda identificarse y se auto-configure automáticamente para su funcionamiento. Esto permitirá al sistema ser robusto frente al gran dinamismo de la red P2P. Además, el nodo agente, se ha definido con un comportamiento íntegro y sigue una secuencia de estados que se detalla a continuación (Figura 3).

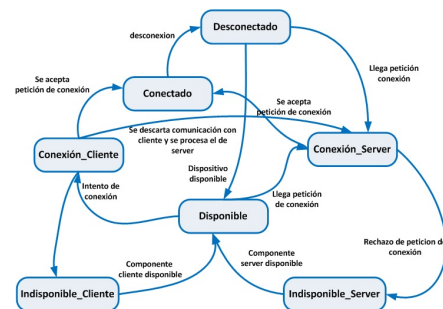
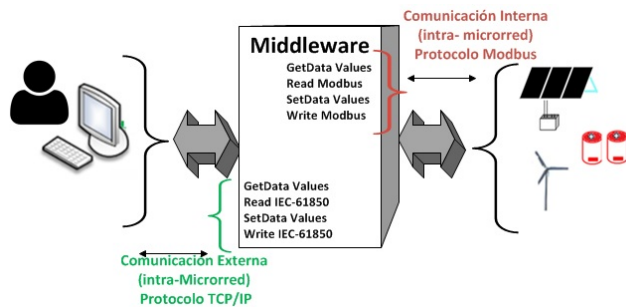


Figura 3: Diagrama de estados de un dispositivos DER (peer)

#### 4.4. Middleware

El middleware desarrollado en la pila de protocolos del agente del controlador local se define como una capa software escalable de interoperabilidad que permite la conversión de protocolos de comunicación; específicamente entre el protocolo de comunicaciones propietario del fabricante, del inversor a controlar

(Modbus) y el protocolo estándar definido para la gestión de la microrred (TCP/IP), por tanto permitirá la interacción entre el gestor de la microrred y el recurso energético distribuido a gestionar ( Véase Figura 4).



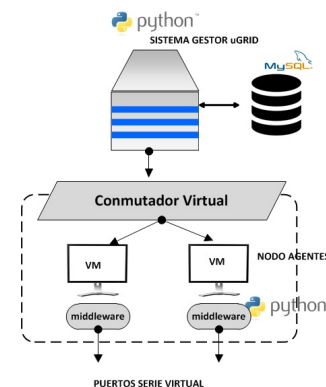
**Figura 4:** Interfaz middleware del sistema

El gestor de la microrred genera los mensajes a enviar siguiendo el modelo de datos de la norma IEC-61850. Así el envío de datos bajo esta norma se presenta como una propuesta normalizada para asegurar la interoperabilidad. Antes de llegar al nodo agente, el middleware mapea los datos para establecer la relación de correspondencia entre los distintos protocolos, tanto en sentido ascendente como descendente, para producir una comunicación bidireccional, con la información necesaria para tomar las decisiones de control adecuadas en cada momento.

#### 4.5. IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN

Para desarrollar el conjunto de programas software se ha utilizado Python 2.7. Para el intercambio de datos entre las distintas aplicaciones (gestor-agentes), se han utilizado sockets. Para la base de datos (BBDD) se decide trabajar con MySQL. La programación del sistema hace uso de técnicas de sistemas distribuidos. Se trata de un sistema concurrente donde la comunicación llevada a cabo es asíncrona o no bloqueante mediante modelos multihilo y modelos de delegados, donde se tiene una organización interna de hilos concurrentes y cooperantes y llamadas a métodos de manera dinámica. Entre las ventajas de realizar la comunicación de manera no bloqueante y asíncrona se encuentran el aprovechamiento de recursos de cómputo y comunicación.

Para validar el funcionamiento de la infraestructura de comunicación propuesta se ha realizado una virtualización de la red con 2 nodos P2P agentes y el nodo P2P gestor. Es posible definir hasta cuatro tarjetas de red en cada máquina virtual. Cada tarjeta de red tiene su propia dirección MAC y su propia dirección IP y se conecta a un conmutador de red virtual. El conmutador virtual a través de una tarjeta de red física permitirá enlazar con el nodo gestor del servidor físico. Las máquinas virtuales en la misma red virtual pueden comunicarse entre sí directamente a través de sus direcciones IP y el puerto TCP correspondiente asignado a esa dirección. Consecuentemente, todos los nodos quedan identificados unívocamente por la dupla (dirección IP + N° puerto). Las comunicaciones desde cada nodo agente al inversor se emulan mediante puertos serie virtuales. La Figura 5 muestra la implementación del sistema con tres nodos.



**Figura 5:** Diagrama de Implementación

Las pruebas realizadas consistieron en ejecutar el sistema para comprobar que los nodos agentes interactúan en un sistema multi-agente distribuido mediante comunicaciones P2P. Para ello se verifican las comunicaciones entre los pares, se comprueba que los nodos-agentes pueden acceder/salir de la red sin alterar el sistema y se determina el funcionamiento de la base de datos ante cualquier cambio de contexto de la red ( Véase Figura 6)

#### 5. CONCLUSIÓN Y LINEAS FUTURAS

Se ha desarrollado una infraestructura de comunicación distribuida basada en MAS con



Figura 6: Detalle de las pruebas de validación del sistema

comunicaciones P2P por software para poder llevar a cabo el control en microrredes inteligentes. Los resultados obtenidos muestran la comunicación exitosa entre los distintos agentes de la red. Los datos generados debido tanto a las entradas y salidas aleatorias de los nodo-agente a la red como a la consulta de parámetros han sido reflejados automáticamente en la base de datos cuando se realizaba una consulta y la comunicación desde el nodo agente hacia el inversor ha sido verificada en el puerto serie virtual. Actualmente el diseño se está implementando en una microrred experimental de 20kVA y se pretende obtener resultados acerca del desempeño (parámetros QoS (*Quality of Service*) del sistema, para lo cual se llevará a cabo la instalación de una consola de gestión así como la activación del protocolo SNMP en el servidor físico lo que permitirá lanzar pruebas de tráfico sintético entre los agentes desplegados en la red para caracterizar y monitorizar el rendimiento de esta (latencias, pérdidas de paquetes, *throughput*, etc.) de forma que se tenga un escenario de pruebas con situaciones de red realistas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ENE2012-37667-C02-01 del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). Beca FPI BES-2013-064539 de estudios de doctorado financiado por MINECO.

## REFERENCIAS

- [1] Mahmooda A, Javaida N, and Razzaq S. A review of wireless communications for smart grid. *Renew Sustain Energy Rev*, 41:248–260, 2015. 1
- [2] Patrao I, Figueres E, Garcera G, and Gonzalez Medina R. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renew Sustain Energy Rev*, 43:415–424, 2015. 1
- [3] Sanseverino E, R, Silvestre M, L, et al. An execution, monitoring and replanning approach for optimal energy management in microgrids. *Energy*, 36:3429–3436, 2011. 1
- [4] Lidula N, W and Rajapakse A, D. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 15:186–202, 2011. 1
- [5] Etxeberria A, Vechiu I, et al. Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids. *Energy Conversion and Management*, 54:113–121, 2012. 1
- [6] A. Luna L. Meng, E. R. Sanseverino et al. Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review. *Renew Sustain Energy Rev*, 60:1263–1273, 2016. 3
- [7] Ndiaye Papa A Ndiaye Abdoul K, Mbodji Mamadou L. Decentralized control of the hybrid electrical system consumption: A multi-agent approach. *Renew Sustain Energy Rev*, 59:972–978, 2016. 3
- [8] Gordon Parker Abhilash Kantamneni, Laura E Brown et al. Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45:192–203, 2015. 3
- [9] J Mylopoulos L Penserini, L Liu et al. Modeling and evaluating cooperation strategies in p2p agent systems. *Agents and Peer-to-Peer Computing*, 2530:87–99, 2015. 3
- [10] Rong Mo Neng Wan, Ke Du et al. A “model to model” collaborative perception methodology for distributed design. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 2014. 3
- [11] Hyeokchan Kwon Jabeom Gu, Jaehoon Nah et al. Performance prediction in peer-to-peer multiagent networks. In *Agents and P2P Computing 6th International Workshop, AP2PC*, 2010. 3
- [12] Weber L Bani-Ahmed A et al. Microgrid communication: State of the art and future trends. In *In 3rd The International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2014. 3
- [13] C Tryfonopoulos D Giouroukis, N Platis. Pviz: Visualising p2p multi-agent simulations. In *AAMAS '15 Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015. 3