

# INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES EN MICRORREDES ELÉCTRICAS

## COMMUNICATION INFRASTRUCTURE IN MICROGRIDS

### RESUMEN

Este artículo presenta un estudio de la actualidad técnica y tecnológica de la infraestructura de comunicaciones utilizadas en microrredes eléctricas, pues ha surgido la necesidad de investigar, analizar, mejorar y desarrollar métodos de comunicación tanto alámbricos como inalámbricos que permitan crear una infraestructura de comunicaciones que soporte las características de control, supervisión y transmisión de información entre dispositivos de control en una microrred de forma eficiente, segura y confiable.

Dadas estas características en el artículo, se analizan las diferentes arquitecturas y topologías propuestas en torno a comunicaciones en el ambiente *Smart Grid* que se puedan adaptar a la forma en que opera una microrred. Se muestran las propuestas y desarrollos realizados en el área de telecomunicaciones concerniente a protocolos de comunicaciones utilizados en microrredes eléctricas, con el fin de conocer las tecnologías, protocolos y algoritmos utilizados en la transmisión de datos.

**Palabras clave:** arquitectura de comunicaciones, microrred eléctrica, protocolos de comunicaciones, topología de red.

### ABSTRACT

This paper shows a study of the technical and technological communications infrastructure currently used in electrical microgrid, in this way it is important investigate, analyze, improve and develop methods to both wired and wireless communication to create a communications infrastructure that support control, monitoring and transmission of information between control devices in a microgrid efficiently, safely and reliably.

Given these characteristics, in this paper is presented the different architectures and topologies proposals around the Smart Grid communications which can be adapted to the shape that operates the microgrid. Also, the proposals and developments made in the area of telecommunications concerning communications protocols used in electrical microgrids, in order to know the technologies, protocols and algorithms used in data transmission are shown.

**Keywords:** communication architecture, microgrid, communication protocols, network topology.

### Elvis Eduardo Gaona García

Ingeniero electrónico, magíster en Ciencias de la Información y las comunicaciones, estudiante de Doctorado en Ingeniería  
Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
egaona@udistrital.edu.co  
Bogotá, Colombia

### César Leonardo Rodríguez Trujillo

Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ingeniería electrónica  
Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
cltrujillo@udistrital.edu.co  
Bogotá, Colombia.

### Herbert Enrique Rojas Cubides

Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, candidato a doctor en Ingeniería Eléctrica  
Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
herojasc@udistrital.edu.co  
Bogotá, Colombia

**Tipo:** Artículo de revisión

**Fecha de Recepción:** Junio 25 de 2014

**Fecha de Aceptación:** Octubre 17 de 2014

## 1. INTRODUCCIÓN

La Generación Distribuida (GD) es una de las alternativas tecnológicas que permite la generación de energía eléctrica cerca del lugar del consumo [1]. Este tipo de generación pretende, con la integración de energías limpias y el uso de tecnologías versátiles en control y comunicaciones, mejorar el funcionamiento del modelo centralizado de red eléctrica al convertirla en una red del futuro: inteligente, interactiva y amigable con el medio ambiente. De esta manera, la inclusión de microrredes con fuentes renovables de energía como la eólica y la fotovoltaica, además del desarrollo de métodos eficientes de almacenamiento de energía, permiten solucionar las problemáticas de generación intermitente presentes en estas formas de generación distribuida [2].

Debido a la variabilidad de la generación, los requerimientos de seguridad y las características de las cargas conectadas, es necesario definir una infraestructura de comunicaciones eficiente que permita la interacción de todos los agentes que configuran la microrred [3], teniendo en cuenta que: i) la disponibilidad de esta infraestructura se basa, en su mayoría, en los diferentes esquemas de conexión y configuraciones de control, y ii) el modo de operación dinámico y cambiante de la microrred es dependiente de los recursos y cargas disponibles en el momento de su funcionamiento.

Para que la operación de la microrred sea autónoma y eficiente, es necesario establecer esquemas de comunicaciones entre los diversos elementos que la componen, y que éstos a su vez cumplan con los requerimientos básicos de una infraestructura de comunicaciones: seguridad, tiempos de retardos bajos, confiabilidad y escalabilidad [4]. Además, si se tiene en cuenta que el esquema de operación de una microrred es dinámico [5], la infraestructura de comunicaciones debe adaptarse al esquema de control que esté operando y la ubicación física de los elementos. Esto tendrá influencia sobre los cambios de topología y los requerimientos de tráfico para el intercambio de información y control. Una interacción que no se encuentre

alineada dentro de los elementos de la microrred por causa de un sistema de comunicaciones poco robusto generará inestabilidad en la operación de la microrred y ocasionará una falla en el servicio [6].

## 2. MICRORRED ELÉCTRICA

Las microrredes eléctricas, conocidas también como *microgrids*, se ubican en el área de media tensión (*medium voltage*, MV) y baja tensión (*low voltage*, LV) en el ámbito de las redes inteligentes *Smart Grid*. Una microrred tiene la capacidad de importar y exportar energía de forma flexible desde y hacia la red, controlar el flujo de potencia activa y potencia reactiva, y gestionar y el almacenamiento de energía [7].

En los últimos años, una de las grandes prioridades a escala mundial es el desarrollo de fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, y en especial el aprovechamiento de fuentes renovables y energías limpias que produzcan una baja contaminación ambiental. Si bien los combustibles fósiles continuarán sufriendo una fracción apreciable del consumo energético, la oferta energética tenderá a ser más diversificada. Opciones como la energía eólica, solar, biomasa renovable e hidrógeno juegan un papel importante en el largo plazo y producirán cambios substanciales en el perfil tecnológico ambiental y organizacional del sistema energético global [8].

Es claro que en el contexto de los lugares no interconectados (que no son beneficiados con el servicio de energía eléctrica), así como en la dinámica de cogeneración energética en la que se emplean energías renovables, es factible implementar sistemas capaces de conectarse a la red eléctrica con el fin de transferir energía proveniente de las fuentes renovables, así como alimentar cargas en ausencia de la misma. A dichos sistemas se les conoce como microrredes [9].

### 2.1. Clases de microrredes

La clasificación de una microrred eléctrica depende de factores tales como: el tipo de genera-

ción empleado, de la carga a alimentar y la disposición física de la microrred, entre otras. Sin embargo, la clasificación más simple se puede dar en términos de la forma de onda de la señal de tensión generada, es decir, si la microrred eléctrica es en corriente directa (DC) o en corriente alterna (AC).

En [10], [11], y [12] se plantea el uso de microrredes eléctricas basadas en corriente directa. En este tipo de configuración, los diferentes sistemas de generación se conectan a través de convertidores a un *bus* (nodo o barra) DC donde también se conectan las cargas y los sistemas de almacenamiento. En el caso de requerir la conexión de cargas AC, se tiene un inversor que asegura las condiciones de calidad de energía adecuadas. En la figura 1 se muestra una microrred en DC.

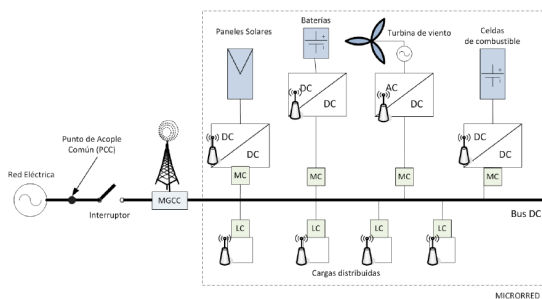


Figura 1. Microrred en DC

Una clasificación adicional de las microrredes en DC depende del nivel de tensión con el que se trabaje. De esta manera es posible trabajar con tensiones producto de la rectificación de sistemas AC monofásicos o trifásicos, o trabajar con tensiones DC típicas, como por ejemplo, los 48 V utilizados en muchos esquemas y trabajos [12]. Generalmente este nivel de tensión es usado por razones de seguridad para el usuario.

Por otra parte, en las microrredes de corriente alterna los sistemas de generación y las cargas conectadas se conectan a través de convertidores a un *bus* AC. Los sistemas de almacenamiento y las cargas en DC requieren de convertidores que adecúan la energía del *bus* AC a sus características particulares. Adicionalmente, el *bus* se conecta en un único punto a la red eléctrica. En la figura 2 se muestra la configuración

de una microrred en AC.

Dentro de las microrredes en AC se presentan diversas posibilidades de clasificación en función del nivel de tensión a la que se opere, así como al tipo de sistema (monofásico o trifásico). Aunque es común encontrar muchos estudios de sistemas en baja tensión [13], también es posible encontrar aplicaciones de microrredes en media tensión [14].

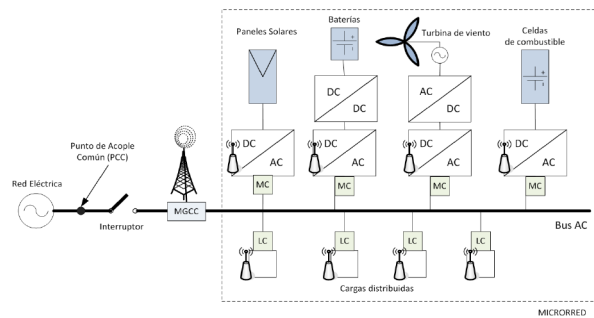


Figura 2. Microrred en AC

### 3. SISTEMA DE COMUNICACIONES EN MICRORREDES ELÉCTRICAS

El sistema de comunicaciones es uno de los factores más relevantes en el funcionamiento de una microrred, pues permite tener un flujo de datos entre las fuentes de generación de potencia y los sistemas de transmisión, distribución y consumo [3].

Debido a la existencia de fuentes renovables como la solar y la eólica, la potencia generada en las fuentes de energía puede incrementarse o disminuir dependiendo de la visibilidad del sol o la disponibilidad del viento. Estos cambios son del orden de milisegundos o inclusive minutos cuando hay ausencia total de sol y viento. De igual manera, la constante conexión y desconexión de cargas sin un adecuado conocimiento del recurso energético disponible genera inestabilidad en la red.

La efectividad del esquema de comunicaciones en la microrred está ligada a la estructura de la microrred y su sistema de control. En cuanto a la estructura, la microrred puede tener un esquema centralizado o descentralizado; y en

cuanto a su sistema de control, éstos se pueden organizar en dos grandes grupos en relación con el uso de los enlaces de comunicaciones que permiten ajustar las consignas impuestas por los controladores a los diferentes módulos [15]. En el primer grupo están las técnicas activas de reparto de carga, clasificadas en cuatro tipos: de control centralizado, maestro-esclavo, cadena circular y el de reparto de carga promedio; en el segundo grupo están los esquemas droop [16].

Los sistemas de comunicaciones implementados en microrredes eléctricas se han realizado de acuerdo con las estrategias de control aplicado en la operación de los inversores, en este sentido a continuación se muestran los protocolos más relevantes empleados en estas estrategias.

### 3.1. Esquema centralizado

Este esquema utiliza un controlador central que coordina las interfaces de potencia en la microrred para mantener el balance de potencia activa y reactiva en condiciones de estado estable [17].

En [18] se implementaron enlaces GPRS entre los transmisores ubicados en estaciones remotas y el centro de control; el monitoreo y gestión de los sitios se realizó utilizando SCADA a través de mensajes MODBUS. Protocolos basados en Zigbee como SimpliciTI se han implementado en [19] con propósitos de gestionar los recursos energéticos de las fuentes y cargas en microrredes aisladas.

### 3.2. Esquema maestro-esclavo

En este esquema, en [20] se emplean protocolos abiertos CAN (*Controller Area Network*) para el enlace de datos entre los inversores; la visualización de los datos se realiza a través del protocolo Modbus-RTU y para el enlace con el centro de control se utiliza Modbus-TCP. En [21] se ha empleado el estándar RS-485 para realizar la operación de la microrred, utilizando en la interfaz maestro-esclavo la plataforma de *labview* entre el control maestro y el local.

### 3.3. Esquemas cadena circular

En esta estrategia la distribución de corriente tiene una trayectoria circular entre los inversores, que requiere de enlaces de datos bidireccionales, esto permitiría tener módulos intercambiables en caliente [22]. En [23] se establece que la transmisión de la información de la corriente de referencia es difícil entre los inversores conectados en paralelo por problemas de interferencia que degradan la fiabilidad del sistema.

### 3.4. Esquemas de reparto de carga promedio

Este esquema requiere de un *bus* de distribución de corriente y sincronización de la referencia del voltaje, con el objetivo de determinar la desviación de las corrientes de salida individuales del valor deseado [24]. Debido a que la conexión física de los inversores es a un *bus* común, los protocolos de comunicaciones empleados son propios de esta topología, como lo es el protocolo CAN. Dada la limitación que tiene este protocolo para la transmisión de señales AC a largas distancias, se ha intentado dar solución enviando las cantidades en DC a través de los inversores en conexión paralelo [25].

### 3.5. Esquemas Droop

Para los esquemas *droop* no es necesario un sistema de comunicaciones complejo (al menos no de comunicaciones críticas) entre los módulos conectados en paralelo, ya que cada módulo fija su referencia de fase y tensión en función de la carga (potencia activa y potencia reactiva consumida). Sin embargo, se han realizado mediciones del ancho de banda necesario para su funcionamiento utilizando también *buses* CAN [26] y protocolos PROFIBUS [27].

En la última década, los sistemas de comunicaciones en redes eléctricas se centran en los medidores inteligentes, los colectores de información y otros dispositivos de gestión de consumo de energía. Mediante éstos, los usuarios y proveedores del servicio (operadores de red) tienen acceso en tiempo real a la información

histórica y actual de las cargas conectadas, el consumo, las pérdidas, las caídas de energía, el flujo de energía y la facturación de los usuarios asociados a la red, comprendido en un marco propuesto como infraestructura avanzada de medida (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*) [9].

Los propósitos de comunicación en la infraestructura AMI están enmarcados en un modelo de capas con el fin de cumplir con el proyecto de escalabilidad y confiabilidad, como premisa de funcionamiento de la red [28]. Para ello se han propuesto una serie de protocolos, tecnologías y estándares, que varían dependiendo del número de capas contempladas en este tipo de redes.

Es común que hoy se relacionen o se ubiquen los protocolos utilizados en alguna de las capas que maneja el modelo TCP/IP, independientemente de si se utilizan o no los protocolos propuestos para este modelo. TCP/IP está compuesto por 4 capas: enlace, red, transporte y aplicación. En cuanto a estándares enfocados a la medición e intercambio información, se ha resaltado en gran medida el estándar DLMS/COSEM, conocido también como IEC 62056. DLMS (*Device Language Message Specification*) compone los estándares y protocolos descritos en IEC 62056, mientras COSEM (*Companion Specification for Energy Metering*) describe la estructura de los datos al nivel de aplicación [29].

Entre los protocolos que componen el estándar DLMS/COSEM se encuentra, a nivel de enlace para transferencia de información punto a punto, el protocolo HDLC; a nivel de transporte y red se utilizan los protocolos UDP/IP tanto para enlaces no orientados a la conexión o TCP/IP para enlaces orientados a la conexión [30] soportados sobre IPv4. Actualmente, la DLMS User Association se encuentra trabajando conjuntamente con ZIGBEE Alliance para incluir DLMS/COSEM sobre redes Zigbee [31]. SML (*Smart Message Language*) y el estándar internacional IEC61850, orientado a la automatización de estaciones [32], de igual forma que COSEM, son enfocados a la capa de aplica-

ción; también se pueden utilizar sobre la pila de protocolos TCP/IP, pero no se ha obtenido el mismo rendimiento como se demuestra en [33].

Para transmisión de información entre equipos inteligentes y estaciones controladoras se ha implementado el estándar DNP3, altamente utilizado en Estados Unidos por empresas prestadoras del servicio de energía, y en varios lugares, expandido para otros servicios como agua o gas [34]. Este estándar cuenta con tres capas, que referenciándolas con el modelo TCP/IP son: enlace, transporte y aplicación. Estudios recientes demuestran la posibilidad de utilizar este estándar sobre TCP/IP en comunicaciones para redes inteligentes [33], [35], [36]. Sin embargo, a pesar de su funcionalidad y su seguridad, presenta limitaciones en cuanto a los tiempos de respuesta [37].

Las redes Zigbee trabajan en las bandas de 2,4 GHz, 915 MHz y 868 MHz, y se caracterizan por tener su propia pila de protocolos. El nivel más bajo utiliza el protocolo IEEE 802.15.4, que define la capa física y de control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia (LR-WPAN) [38]. Las capas siguientes están definidas por Zigbee Alliance, y en último lugar está la aplicación definida por el usuario [39]. Enfocados a redes inteligentes, se han realizado proyectos para transmisión de información desde un medidor inteligente para una red AMI [40] y se han propuesto soluciones para actualizar la red de medidores analógicos en India a través de una red Zigbee [31]. En los últimos años, Zigbee Alliance se encuentra desarrollando la actualización 2.0 del perfil dedicado a redes inteligentes conocido como *Zigbee Smart Energy* [41].

Otra de las tecnologías utilizadas actualmente, por las ventajas que se tienen en cuanto a la infraestructura actual, es la tecnología PLC (*Power Line Communication - IEC 61334*), que tiene control sobre toda la red de energía [36]. Aunque esta tecnología provee buena cobertura, tiene inconvenientes con el ruido, la distorsión y la atenuación sobre sus líneas que se han mejorado últimamente [42].

#### 4. ARQUITECTURA DE LA RED DE COMUNICACIONES

Con el fin de describir la arquitectura de red de comunicaciones en una microrred, se debe realizar una clasificación en función de su cobertura. Dentro de las alternativas se tienen las redes de área doméstica (*Home Area Network, HAN*), las redes de áreas vecinas (*Neighborhood Area Network, NAN*) y las redes de área amplia (*Wide Area Network, WAN*). Las potenciales tecnologías a utilizar en estas redes de comunicaciones se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Tipo de red y tecnologías utilizadas en Microrredes [31]

Tipo de red	Distancia	Requerimientos de tasa de transmisión de datos	Tecnologías potenciales
HAN	10 m	Depende de la aplicación, generalmente baja tasa para información de control	Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC.
NAN	100 m	Depende de la densidad de nodos sobre la red (e.g. 2 kbps en el caso de 500 metros enviando 60 byte de medición cada 2 minutos por NAN)	Wi-Fi, Radioenlaces, GPRS/EDGE, PLC.
WAN	10 km	Dispositivos de alta capacidad como enrutadores/ conmutadores de alta velocidad (unos 100 Mbps a pocos Gbps)	Ethernet, Microondas, Wimax, 3G/LTE, Enlaces Fibra óptica

##### 4.1. HAN

Las redes HAN proveen enlaces bidireccionales entre electrodomésticos y equipos, con un bajo ancho de banda del orden de 10-100 Kbps por dispositivo. La información transmitida normalmente corresponde al consumo de energía desde los medidores inteligentes. Además, en este tipo de redes las conexiones son flexibles y de bajo costo debido a que la latencia

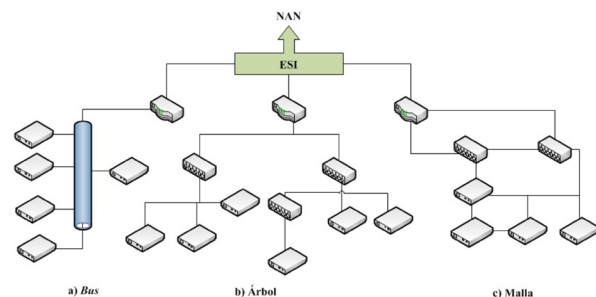
es baja y no necesaria. Las tecnologías inalámbricas más utilizadas en este tipo de redes son Zigbee, Bluetooth y Wi-Fi. De éstas se destaca Zigbee, gracias a su bajo consumo de energía y sus prestaciones para monitorear dispositivos por medio inalámbrico [36]. En las cableadas se destacan PLC y Ethernet.

Existen varias formas de interconectar dispositivos en una casa, dependiendo de su medio físico y los protocolos de comunicaciones a utilizarse. En la figura 3 se muestran las posibles topologías.

**Topología bus:** los dispositivos comparten un medio de transmisión común (figura 3a). Por ejemplo se utiliza el cable coaxial o las líneas de energía.

**Topología en árbol:** todos los dispositivos se conectan a través de un nodo central que es la raíz en una topología árbol (figura 3b). Como ejemplos están el uso de un punto de acceso Wi-Fi (*Access Point, AP*) enlazándose con dispositivos IEEE 802.11, y un enrutador utilizado para conectar dispositivos a través de par trenzado.

**Topología malla:** los dispositivos se interconectan entre todos, cada nodo participa manteniendo enlaces con sus vecinos y encaminando mensajes hacia sus destinatarios (figura 3c). Esta topología es usada en enlaces inalámbricos cuando es necesario fiabilidad y conectividad.



**Figura 3.** Posibles topologías en una red HAN [43]

##### 4.2. NAN o FAN

En este tipo de red, los enlaces de comunicaciones son bidireccionales entre las estaciones

de control y las instalaciones de los usuarios. Además, los datos recolectados en los medidores de las HAN son enviados al nodo central de control de la microrred para las acciones necesarias en la gestión de los recursos energéticos. Esta red está soportada sobre la infraestructura avanzada de medición (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*), la distribución automática avanzada (*Advanced Distribution Automation, ADA*) y la integración de las fuentes de energía distribuidas (*Distributed Energy Resource, DER*). Las tecnologías que pueden usarse en una arquitectura FAN son Wi-Fi, radioenlaces, Wi-MAX, GPRS/EDGE y PLC/BPLC.

Para el intercambio de información al exterior de una HAN es necesario implementar una interfaz de servicio de energía (*Energy Service Interface, ESI*) que en la NAN provee conexión externa con el resto de la red para el acceso a la información de la medición y las funciones de la respuesta de la demanda.

Los factores ambientales afectan el rendimiento de la red de comunicaciones así como la ubicación geográfica, la densidad de nodos y la interferencia de la señal. Todas éstas son consideraciones que deben tenerse en cuenta en la selección de la arquitectura de las NAN. En la figura 4 se muestran dos posibles topologías de redes.

*Topología en árbol:* cada interfaz ESI como nodo hoja tiene un enlace punto a punto con el recolector de nivel superior como nodo raíz (figura 4).

*Topología malla:* cada interfaz ESI tiene una conexión punto a punto con otra interfaz ESI de otros nodos NAN en la red (figura 5). En ambientes inalámbricos se utilizan para mejorar la fiabilidad y la resiliencia de los enlaces de comunicaciones y extender el área de cobertura.

Las funciones que describen la topología en una NAN se clasifican de la siguiente manera:

**Función ESI:** esta función finaliza el enlace de comunicaciones NAN del lado HAN. Adicionalmente, puede tener funciones de encami-

namiento para formar la topología de malla completa o tener funciones de reenvío para comunicarse con un grupo de nodos específicos en una topología árbol.

**Función colector:** esta función es propia de la infraestructura AMI en el IETF RFC6272. En el modelo de topología NAN, esta función finaliza el enlace de comunicaciones del lado WAN. También puede agregar y desagregar datos desde y hacia colectores subyacentes, relevadores y la ESI respectivamente.

**Función relay:** es una función de encaminamiento para formar una topología de malla completa en una NAN. Permite trabajar entre colectores y ESI con el fin de controlar las métricas de encaminamiento en redes de malla de múltiples saltos. Esta función puede implementarse separadamente con el fin de tener redundancia en la red o cubrir un área más extensa.

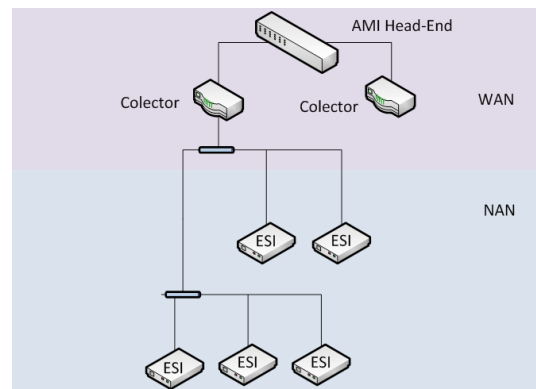


Figura 4. Topología NAN en árbol [43]

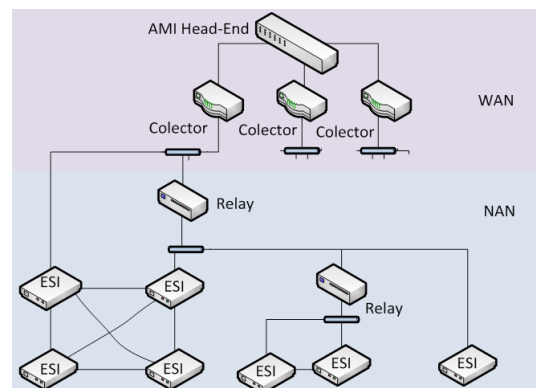


Figura 5. Topología NAN en malla [43]

### 4.3. WAN

Cualquier red más allá de una NAN o del último punto de agregación de información de medición pertenece a una WAN. Estos esquemas son de anchos de banda superiores a los de una NAN, de dos vías para distancias largas que tienen aplicaciones de monitoreo efectivo y aplicaciones de sensado. Esta red es crítica, en cuanto a la respuesta en tiempo real y cambio de modo seguro, especialmente cuando la microrred opera en modo interconectado a través del punto de acoplamiento común (*Point of common coupling*, PCC).

## 5. PERSPECTIVA DE LA INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES PARA MICRORREDES

La topología de la infraestructura del sistema de comunicaciones en la microrred debe permitir adaptarse a sus condiciones de operación. Siendo esta operación dinámica y cambiante, los nodos de una red NAN y HAN deben contar con funcionalidades que les facilite su reconfiguración. En redes inalámbricas, este esquema requiere del uso de protocolos de encaminamiento que se adapten a los cambios de fuentes y conexiones de cargas que tiene la microrred para así garantizar la transmisión de los datos con los requerimientos necesarios de ancho de banda y latencia.

En entornos de las redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks*, WSN) se han desarrollado algoritmos de encaminamiento con diferentes categorías para Smart Grid [44]. Dado que en la actualidad no existen algoritmos de encaminamiento aplicado a las WSN en microrredes, aún se están estandarizando las capas de red y transporte del modelo ISO/OSI [37]. Estos protocolos deben ser compatibles con los requerimientos de la red según sus aplicaciones para Smart Grid mostrados en la tabla 2.

**Tabla 2.** Aplicaciones y requerimientos de red en Smart Grid [44]

Aplicación	Requerimientos de red	
	Ancho de banda	Latencia
AMI	10-100 Kbps/nodo, 500 Kbps backhaul	2-15 s
Respuesta a la demanda	14-100 Kbps por nodo/dispositivo	500ms-varios minutos
Conocimiento del comportamiento en área amplia	9.6-56 Kbps	20-200 ms
DER y almacenamiento	600-1500 Kbps	20 ms-15 s
Transporte eléctrico	9.6-56 Kbps, 100 Kbps es buen objetivo	2 s-5 min
Gestión distribuida	9.6-100 Kbps	100 ms-2 s

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado la revisión de la infraestructura del sistema de comunicaciones utilizado en microrredes en términos de su arquitectura según su cobertura y las características de los enlaces para cada una, así como sus topologías. Se han identificado los esquemas de control de la microrred eléctrica y la estrecha dependencia del sistema de comunicaciones a este esquema.

El control y la operación de las futuras redes eléctricas, incluyendo microrredes, necesitan apoyarse por sofisticados sistemas de información (ISS) y redes de comunicaciones avanzadas. En la actualidad, varias tecnologías se han utilizado o probado en los sistemas distribuidos y se espera que su uso se haga más extensivo durante los próximos años. El enfoque habitual es utilizar soluciones existentes como punto de partida, por ejemplo en Smart Grid para desarrollar nuevas aplicaciones en las microrredes.



## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar su agradecimiento al Centro de Investigación y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el apoyo dado al desarrollo

de este trabajo a través de la convocatoria 13 de 2013, mediante el proyecto de investigación titulado “Metodología para la implementación de un sistema de comunicaciones en microrredes eléctricas”, institucionalizado con código 2-195-405-1.

### Referencias

- [1] H. B. Puttgen, P. R. Macgregor, and F. C. Lambert, “Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?,” *Power and Energy Magazine*, IEEE, no. 1, pp. 22-29, Feb. 2003.
- [2] H. Hussein, S. Harb, and N. Kutkut, “Design considerations for distributed micro-storage systems in residential applications,” presented at the 32nd *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2010.
- [3] S. Safdar, B. Hamdaoui, E. Cotilla-Sanchez, and M. Guizani, “A survey on communication infrastructure for micro-grids,” presented at the *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2013.
- [4] D. Rua, L. Pereira, Gil N, and J. a. Peças Lopes, “Impact of multi-Microgrid Communication systems in islanded operation,” presented at the *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2011.
- [5] Z. Ding, M. Liu, W.J. Lee, and D. Wetz, “An autonomous operation microgrid for rural electrification,” presented at the 2013 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct. 2013.
- [6] H. Liang, S. Member, B. J. Choi, and W. Zhuang, “Stability Enhancement of Decentralized Inverter Control Through Wireless Communications in Microgrids,” *Smart Grid, IEEE Transactions*, vol. 4, no. 1, pp. 321–331, 2013.
- [7] J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids— A general approach toward standardization,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [8] R. Burrett, R. Dixon, M. Eckhart, D. Hales, and A. Kloke-lesch, “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21 Steering Committee,” Paris, 2009.
- [9] D. G. Hart, “Using AMI to realize the Smart Grid,” presented at the *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- [10] K. Shenai and K. Shah, “Smart DC microgrid for efficient utilization of distributed renewable energy,” presented at the *Energytech*, 2011 IEEE, 2011.
- [11] W. Jiang and Y. Zhang, “Load Sharing Techniques in Hybrid Power Systems for DC Micro-Grids,” presented at the *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011.
- [12] A. Kwasinski and P. Krein, “A microgrid-based telecom power system using modular multiple-input dc-dc converters,” presented at the *Telecommunications Conference (INTELEC'05) Twenty-Seventh International*, 2005.
- [13] J. Quesada, R. Sebastián, M. Castro, and J. A. Sainz, “Control of inverters in a low voltage microgrid with distributed battery energy storage. Part I: Primary control,” *Electric Power Systems Research*, vol. 114, pp. 126–135, Sep. 2014.
- [14] W. Huang, “Power flow analysis of a grid-connected high-voltage microgrid with various distributed resources,” presented at the *Second International Conference on Mechanic Automation and Control*

- Engineering*, 2011.
- [15] J. M. Guerrero, S. Member, J. C. Vásquez, J. Matas, M. Castilla, and L. G. De Vicuña, “Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 56, no. 3, pp. 726–736, 2009.
- [16] C. L. Trujillo, “*Concepción de controladores reconfigurables para microinversores fotovoltaicos operando como unidades autónomas de generación de energía en microrredes*,” Phd thesis, Universidad Politécnica de Valencia, España 2011.
- [17] A. Engler, O. Osika, M. Barnes, N. Jenkins, and A. Arulampalam, “DB1 Local Micro Source controller strategies and algorithms,” *Eur. Comm. Brussels, Belgium*. [Online]. Available: [www.microgrids.eu/micro2000](http://www.microgrids.eu/micro2000), 2004.
- [18] M. Moghavvemi, M. S. Ismail, B. Murali, S. S. Yang, A. Attaran, and S. Moghavvemi, “Development and optimization of a PV/diesel hybrid supply system for remote controlled commercial large scale FM transmitters,” *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 542–551, Nov. 2013.
- [19] A. Llaría, O. Curea, J. Jim, and L. Mart, “Wireless communication system for microgrids management in islanding Proposed managent system,” *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on. IEEE*, 2011. pp. 2–11.
- [20] Y. Zhu, F. Zhuo, and L. Xiong, “Communication platform for energy management system in a master-slave control structure microgrid,” presented at the *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 2012..
- [21] S. Thale and V. Agarwal, “Design and implementation of communication and control architecture for solar PV based microgrid supported by PEM Fuel Cell based auxiliary source,” presented at the *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Jun. 2011.
- [22] T. Wu, S. Member, Y. Chen, and Y. Huang, “3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 47, no. 2, pp. 273–281, 2000.
- [23] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, “Parallel operation of inverters and active power filters in distributed generation system—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 5155–5168, Dec. 2011.
- [24] A. Scheme, X. Sun, Y. Lee, S. Member, and D. Xu, “Modeling , Analysis , and Implementation of Parallel Multi-Inverter Systems With Instantaneous,” *Power Electronics, IEEE Transactions*, vol. 18, no. 3, pp. 844–856, 2003.
- [25] C. Chen, S. Member, Y. Wang, J. J. Lai, Y. Lee, and D. Martin, “Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Microgrid Applications,” *Power Electronics, IEEE Transactions*, vol. 25, no. 1, pp. 6–15, 2010.
- [26] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, “A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems,” *Power Electronics, IEEE Transactions*, vol. 19, no. 5, pp. 1205–1213, Sep. 2004.
- [27] F. L. Lewis, Z. Qu, A. Davoudi, and A. Bidram, “Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 8, pp. 822–831, Aug. 2013.
- [28] T. Khalifa, K. Naik, and A. Nayak, “A Survey of Communication Protocols for Automatic Meter Reading Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 2, pp. 168–182, 2011.
- [29] “DLMS User Association,” *¿WHAT IS COSEM?*, 2014. [Online]. Available: <http://www.dlms.com/faqanswers/generalquestions/whatiscosem.php>. [Accessed: 01-Apr-2014].
- [30] D. Vyas and H. Pandya, “Advance Metering Infrastructure and DLMS/COSEM Standards for Smart Grid,”

- International Journal of Engineering*, vol. 1, no. 10, pp. 1–5, 2012.
- [31] Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, and C. Efthymiou, “Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities,” *Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 21–38, 2012.
- [32] S. Feuerhahn, M. Zillgith, C. Wittwer, and C. Wietfeld, “Comparison of the communication protocols DLMS/COSEM, SML and IEC 61850 for smart metering applications,” presented at the *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2011.
- [33] B. Yoo, H.-S. Yang, S. Yang, Y. Jeong, and W. Kim, “CAN to IEC 61850 for microgrid system,” presented at the *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011.
- [34] X. Lu, Z. Lu, and W. Wang, “On Network Performance Evaluation toward the Smart Grid: A Case Study of DNP3 over TCP/IP,” presented at the *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, Dec. 2011.
- [35] X. Lu, W. Wang, and J. Ma, “An empirical study of communication infrastructures towards the smart grid: Design, implementation, and evaluation,” *Smart Grid, IEEE Transactions*, vol. 4, no. 1, pp. 170–183, 2013.
- [36] K. De Craemer and G. Deconinck, “Analysis of state-of-the-art smart metering communication standards,” presented at the *Proceedings of the 5th Young Researchers Symposium*, 2010.
- [37] S. Bukowski and S. Ranade, “Communication network requirements for the Smart Grid and a path for an IP based protocol for customer driven microgrids,” presented at the *Energytech, 2012 IEEE*, 2012.
- [38] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.4: *Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, IEEE Standard 802(4), 8482, 2000..
- [39] M. Manigandan and B. Basavaraja, “Active and reactive power control of MICROGRID using wireless technology (ZigBee 2.4 GHz),” presented at the *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON 2011)*, 2011.
- [40] P. Prudhvi, D. Bhalodi, M. Manohar, V. Padidela, and S. Adapa, “A smart energy meter architecture in Indian context,” presented at the *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012.
- [41] “Zigbee Alliance,” *Smart Energy 2*. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/Standards/ZigBeeSmartEnergy/Version20Documents.aspx>. [Accessed: 03-Jun-2014].
- [42] R. Majumder, G. Bag, and K. Kim, “Power Sharing and Control in Distributed Generation with wireless sensor networks,” *Smart Grid, IEEE Transactions*, vol. 3, no.2, pp. 618-634, 2012.
- [43] ITU (International Telecommunication Union), “Deliverable on Smart Grid Architecture.” ITU, Geneva, p. 54, 2011.
- [44] N. Saputro, K. Akkaya, and S. Uludag, “A survey of routing protocols for smart grid communications,” *Computer Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2742–2771, Jul. 2012.