

## EVOLUCIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS HACIA *SMART GRID* EN PAÍSES DE LA REGIÓN ANDINA

### *EVOLUTION OF THE ELECTRICITY NETWORKS TOWARDS SMART GRID IN THE ANDEAN REGION COUNTRIES*

**Arturo G. Peralta Sevilla**

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca (Ecuador)

**Ferney Amaya Fernández**

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia)

#### Resumen

Uno de los grandes interrogantes actuales está relacionado con la generación y uso de la energía eléctrica, ya que se espera un incremento en los costos de generación, incluidos los países de la Región Andina. Por lo tanto, en este artículo se presenta en primera instancia un análisis de la problemática que conlleva la configuración de los sistemas eléctricos de potencia actuales, luego se plantean algunos componentes importantes y sus requerimientos que dirigen la evolución del sistema de distribución de energía eléctrica hacia *Smart Grid*, que le brinda mayor inteligencia al sistema (infraestructura de medición avanzada), integrando las tecnologías de la información y la comunicación (modelos de arquitecturas de telecomunicaciones), ofreciendo un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía alternativa (generación distribuida – micro redes), una más rápida respuesta a los fallos y una adaptación al uso de los vehículos eléctricos (interacción entre red de energía y vehículos eléctricos conectados). Lo anterior de cara a la evolución de *Smart Grid* en los países de la Región Andina.

**Palabras clave:** red de energía inteligente, Smart Grid, sistema eléctrico de potencia, fuentes de energía distribuida, vehículos eléctricos conectados, infraestructura de medición avanzada

#### Abstract

Nowadays, one of the main unanswered questions is related to the production and use of electricity because it is expected an increase in the cost of generation, including the Andean Countries. Reason given, this article presents an analysis of the problems that the configurations of Electric Systems of Modern Potency entail. Furthermore, some important components and the requirements that guide the

evolution of the electric energy distribution system towards Smart Grid are formulated. These components give an intelligence improvement to the system (Advanced Metering Infrastructure), integrating the Information and Communication Technologies (Telecommunication Architecture Models), offering a better exploitation of the alternative energy fonts (Distributed Generation – Micro networks), a faster answer to failure, and an adaptation to the use of Electric Vehicles (Interaction between Energy Networks and Plug-in Electric Vehicles). In conclusion, all the process mentioned above will go towards the evolution of Smart Grid in the Andean Countries.

**Keywords:** Smart Grid, electrical power system, distributed energy resources, plug-in electric vehicles, advanced metering infrastructure

## Introducción

Uno de los grandes interrogantes de la población mundial consiste en cómo generar y usar la energía eléctrica, a la vez que se protege el medio ambiente y se logra un desarrollo sostenible. En este sentido, los mayores consumidores de energía eléctrica en el mundo que son Estados Unidos y la Unión Europea, han desarrollado un plan para construir una red inteligente de distribución de energía eléctrica (Smart Grid) que permita gestionar el recurso energético de una forma flexible, limpia, segura, confiable y económica. Lo anterior considerando que pese a las campañas internacionales por generar energía en forma amigable con el medioambiente, no se ha logrado a nivel mundial disminuir el consumo energético y la tendencia es a mantener los niveles de consumo actuales. Esto a excepción de Europa, que ha logrado disminuir su consumo gracias al impulso por el uso de energías alternativas.

En los próximos años se espera un incremento en los costos de la energía eléctrica debido al incremento en los costos de producción. Esto unido al efecto del cambio climático, principalmente en los países de la zona andina, modificará las costumbres en la generación y consumo energético haciéndola más costosa. Adicionalmente, estas costumbres de consumo serán impactadas por la esperada masificación de los vehículos eléctricos.

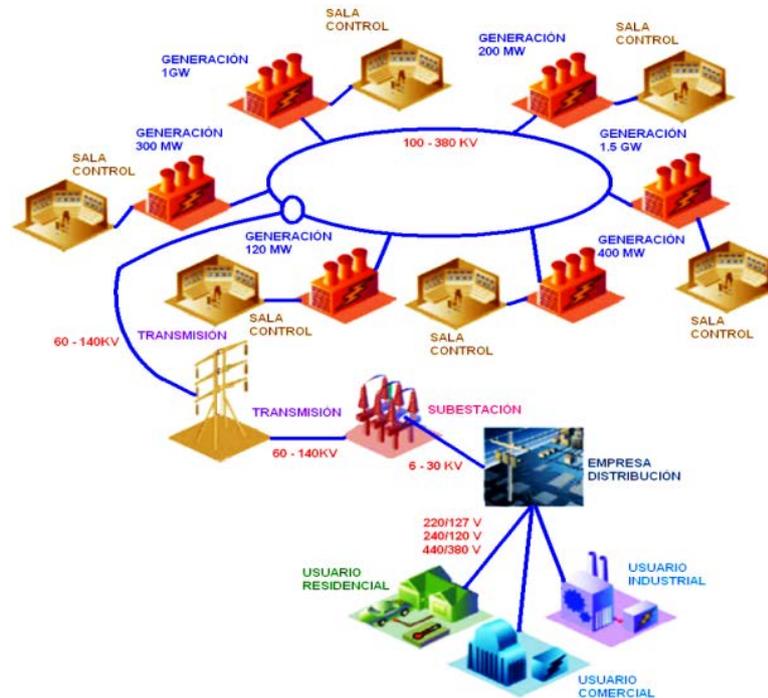
Este artículo presenta la evolución del sistema de distribución de energía eléctrica hacia Smart Grid, que le brinda mayor inteligencia al sistema integrando las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Se presentan las características de Smart Grid

que permitirán que el sistema eléctrico se adapte a futuros requerimientos, incluidos: un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía alternativa, una más rápida respuesta a los cambios y una adaptación al uso de los vehículos eléctricos. Lo anterior de cara a la evolución de Smart Grid en los países de la Región Andina.

El artículo está organizado de la siguiente forma. En la Sección II se presenta la situación actual de las redes de energía eléctrica en países de la Región Andina, resaltando los inconvenientes que se despliegan de una estructura de red eléctrica centralizada. En la Sección III se presenta una visión hacia una red inteligente de distribución de potencia (Smart Grid), presentando sus principales características y aplicaciones. En la sección IV se presentan tecnologías de telecomunicaciones que soportan Smart Grid. Finalmente se da cierre resaltando importantes conclusiones.

## Situación Actual del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)

Países de la Región Andina de Sur América como son el caso de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina, tienen un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) en una estructura totalmente centralizada. Esta estructura interconecta mediante anillos o barras a diferentes Centrales de Generación que aportan desde cientos de Megavatios (MW) hasta algunos Gigavatios (GW), operando niveles de Alta Tensión 60–220 Kilovoltios (KV) y Ultra Alta Tensión (mayores a 220 KV). La energía eléctrica luego se distribuye a subestaciones que disminuyen el nivel de tensión a valores en el rango de Alta Tensión (60–140 KV).



Figural: Situación Actual de un SEP centralizado.

Fuente: Autores.

Posteriormente, la energía llega a las empresas de distribución, a través de topologías en árbol para luego proporcionar la energía a los usuarios finales. Este árbol está compuesto por la red primaria o tronco, conformado con una serie de alimentadores con voltajes entre 6–30 KV, que llevan la energía hasta las ramas. En las ramas o red secundaria se encuentran varios centros de transformación con tensiones características de 440–380 V / 220–127 V / 240–120 V. La estructura completa del SEP puede apreciarse en la *Figural: Situación Actual de un SEP centralizado*.

En un SEP Centralizado la energía normalmente recorre trayectos demasiado extensos, generando grandes pérdidas por el transporte de la energía. Adicionalmente, la generación depende del clima local. Por ejemplo, en temporadas con escasas de lluvia por lapsos de tiempos prolongados en zonas donde se encuentran emplazamientos de grandes centrales de Generación Hidroeléctrica, se afecta la inyección del flujo de potencia en el sistema global, aumentando la probabilidad de suspender el suministro en grandes áreas geográficas. Esto evidencia la carencia de flexibilidad y escalabilidad que presenta una estructura de generación

centralizada. Inconvenientes similares pueden ocurrir con centrales de generación térmica que emplean combustibles fósiles. Esto además de los daños al medioambiente debido a la generación de gases de efecto invernadero, por el aumento de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Para mejorar la calidad en la prestación del servicio en el sistema eléctrico, antes reguladores en diferentes países impulsaron la adición de una red de comunicaciones a la estructura SEP para mejorar el monitoreo y control del sistema, principalmente en las etapas de generación y transmisión. Esta mejora no implicó cambios en la estructura del SEP. La red de comunicaciones emplea SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), una arquitectura de comunicación centralizada en configuración jerárquica maestro–esclavo. El diagrama esquemático para este sistema de comunicación se presenta en la *Figura 2: Red de comunicaciones centralizada mediante SCADA*. Aunque SCADA permite automatizar algunos procesos en el sistema, no admite la interacción con los usuarios finales, ya que la operatividad de los sistemas SCADA actuales no se extiende más allá de las subestaciones que se enlazan con las empresas de distribución.

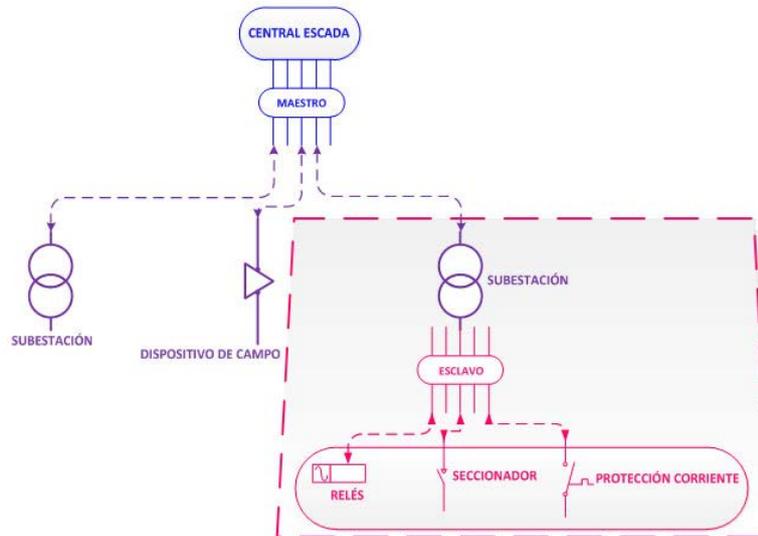


Figura 2: Red de comunicaciones centralizada mediante SCADA.

Fuente: Autores

Una mayor integración de las TIC en el sistema eléctrico, permitiría alcanzar una gran eficiencia e interacción con los usuarios finales. Esto teniendo en cuenta que el abonado hoy tiene un rol pasivo en el sistema eléctrico. Un mayor uso de las TIC permitiría capturar información de los usuarios que ayudaría a optimizar la distribución y consumo de la energía en el sistema eléctrico. Esta mayor interacción con los usuarios origina nuevas oportunidades de negocios, lo cual es posible con Smart Grid, en donde es necesario repensar la arquitectura de la red de energía eléctrica y cómo esta se integra con las TIC.

### ***Visión hacia una red inteligente***

No hay una definición formal para indicar el significado de Smart Grid o red inteligente, pero en términos generales se puede decir que es la convergencia de avances y desarrollos tecnológicos que ayudan a modernizar la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, optimizando la operación del sistema, cabe indicar que revisando la bibliografía existente sobre este tema no se ha hecho un análisis sobre lo indicado anteriormente respecto a la situación actual de los SEP en países de la Región Andina, por lo tanto es la primera vez que se propone alternativas para cambiar o reconfigurar las redes de energía en dichos países.

Smart Grid facilita la prevención y reducción de fallas en los equipos, incluyendo las fallas por errores

humanos. Además, permite optimizar la capacidad instalada y automatizar los programas de mantenimiento. Adicionalmente, ayuda a reducir las pérdidas en la transmisión y distribución de energía al implementar generación distribuida y hace más eficiente el consumo por parte de los usuarios. Las siguientes son algunas de las características que Smart Grid brindaría al sistema eléctrico:

- **Escalabilidad:** eficiencia y rapidez en la respuesta a la demanda dinámica, ofreciendo la flexibilidad de reconfigurar y redireccionar los flujos de potencia.
- **Confiabilidad:** disponibilidad de los recursos relacionados con la gestión, monitoreo, operación y control del sistema. Confiabilidad en la respuesta del sistema y en los esquemas de tarificación.
- **Seguridad energética:** permitiría integrar fuentes de energía renovable (Solar, Eólica, Biomasa) y disponer de almacenamiento de la energía cuando existan problemas en el suministro de energía desde las fuentes tradicionales.
- **Sustentabilidad:** uso y distribución adecuada y eficiente, mediante fuentes de energía amigables con el medioambiente.
- **Competitividad:** eficiencia en el consumo energético, reduciendo los costos, ofreciendo la posibilidad de la venta de energía a otros países.

En las siguientes líneas se presentan las aplicaciones más relevantes que soporta Smart Grid, se incluye un corto estado del arte.

## Generación Distribuida

Para brindar mayor escalabilidad y confiabilidad al sistema de energía eléctrica, es necesario pasar de una estructura centralizada–estática, a una estructura distribuida–dinámica. En términos de una red inteligente esto se conoce como DER (Distributed Energy Resources) De esta forma se pasa de tener pocos centros de generación a tener muchos centros distribuidos en toda la red eléctrica, que pueden ser

renovables y/o tradicionales, formando micro-redes interconectadas, como se presenta en la *Figura. 3. Generación Distribuida mediante micro redes.*

La principal ventaja de tener DER es la posibilidad de que los Operadores de la Red de Distribución (Distribution Network Operator, DNO), puedan reconfigurar y redireccionar el flujo de potencia en forma rápida y eficiente, en respuesta a eventos como: fallos, cambios en la demanda o incluso cambios en los costos de generación de la energía.

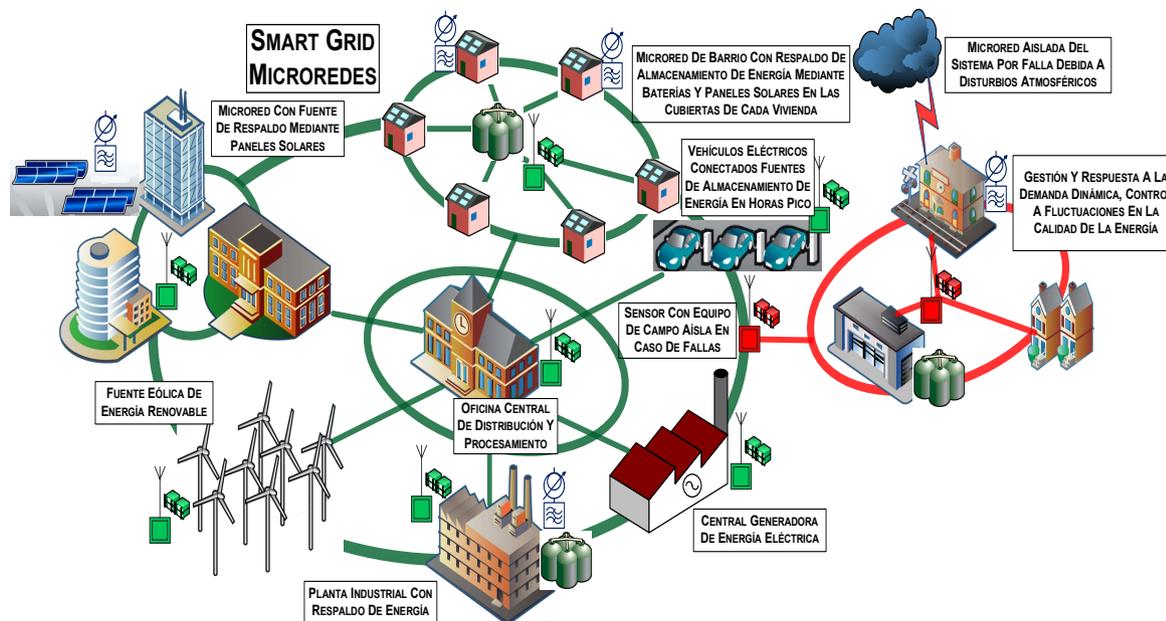


Figura. 3. Generación Distribuida mediante micro redes.

Fuente: Autores

Al emplear energías renovables como la eólica y la fotovoltaica, se obtienen menores costos de generación esto en comparación con las fuentes tradicionales. Sin embargo, la disponibilidad de las fuentes renovables está sujeta a las condiciones ambientales como la intensidad del viento y la nubosidad que afecta la intensidad de la luz solar. Por esta razón, en la mayoría de los casos la generación alternativa debe acompañarse de baterías y deben considerarse estrategias de planificación de la generación. Al respecto, en (Bu, Yu, Liu, & Zhang, 2011) se propone el uso de Modelos Ocultos de Markov para planificar la demanda considerando fuentes de energías renovables, tradicionales, y considerando factores asociados a cada fuente como costos de generación, mantenimiento, confiabilidad y su impacto ambiental.

El almacenamiento y respaldo debe considerarse en DER, ya que el flujo de carga y el voltaje deben permanecer casi constantes, a pesar de que la generación como en el caso de las fuentes alternativas, es intermitente. Las baterías tradicionales de plomo–ácido, sulfuro de sodio e iones de litio, permiten almacenar la energía. Una fuerte línea de investigación y desarrollo es el uso de materiales y aleaciones que permitan desarrollar baterías de mayor capacidad, durabilidad y menor costo que las actuales. En este sentido, en (Xiao, 2012) se presentan membranas y celdas en proceso de investigación como son las PEM (Polymer Electrolyte Membrane), e Hydrogen Fuel Cells, para la conformación de baterías de alto desempeño.

## Infraestructura de Medición Avanzada

La infraestructura de medición avanzada (Advanced Metering Infrastructure, AMI) será un componente vital en Smart Grid, al proporcionar información que puede emplearse para optimizar la operación y comercialización del sistema eléctrico.

AMI permite recopilar los datos de la medición del consumo energético de los usuarios para efectos de facturación, medición de perfiles de consumo y medición de variables eléctricas. AMI evita realizar procesos intensivos como: la medición en sitio del consumo, acciones de conexión y desconexión del servicio y la gestión para la restauración del servicio. AMI soporta el monitoreo en tiempo real de los precios de la energía, permitiendo a las empresas de servicios públicos implementar un control directo en la gestión de la demanda y responder rápidamente a sus variaciones (Automated Demand Response, ADR).

Considerando la detección de fallas en AMI, en (Overman & Sackman, 2010) se introduce el término de Red Inteligente de Alta Fiabilidad (HASG), que define un modelo de confianza en la red eléctrica, con una arquitectura distribuida diseñada para mitigar fallos en el sistema, incluyendo: fallos en la comunicación, fallos en dispositivos como sensores, actuadores y/o controladores o fallos debidos al sistema de control y planificación. Posteriormente se presenta la estructura de la red de comunicaciones en Smart Grid que soporta AMI.

## Vehículos Eléctricos

En los próximos años se espera un incremento considerable en la penetración de los Vehículos Eléctricos (VE) y los más comunes serán los Vehículos Eléctricos Conectados (PEV – Plug-In Electric Vehicle). El desarrollo de los PVEs implica hacer más liviana la carrocería, extender el tiempo de duración de las baterías y disminuir su tiempo de recarga.

El despliegue de esta tecnología presenta dos grandes desafíos al sistema eléctrico. El primero es el impacto

en la demanda energética debido a los procesos de carga que pueden ocurrir en las horas pico. El segundo consiste en que las baterías de estos vehículos pueden convertirse en fuentes de almacenamiento, respaldo y posible suministro de energía a la red eléctrica. Al respecto, en (Tuttle & Baldick, 2012), (Käbisch, Schmitt, Winter, & Heuer, 2010), (Bouhafs, Mackay, & Merabti, 2012), se mencionan los requerimientos que debe satisfacer Smart Grid para afrontar estos desafíos.

En (Tuttle & Baldick, 2012) se proyectan cuatro generaciones en las que se desarrollará la tecnología PEV, con cambios en el flujo de energía que puede ser: de la red eléctrica al vehículo (R-V) del vehículo a una carga aislada (V-C) y del vehículo a la red eléctrica (V-R). Para evitar demandas pico, se definen desde el vehículo intervalos de carga considerando variaciones en la demanda y en los costos.

En la *Tabla 1* se presentan las características de las diferentes generaciones del desarrollo de PVE y en la *Fig. 4* se presenta la proyección de vehículos eléctricos en las diferentes generaciones para el mercado de Estados Unidos, uno de los pocos países que presenta este tipo de información.

En la primera generación se tendrá un flujo de energía R-V con unos requerimientos básicos sobre el sistema de telecomunicaciones. La segunda generación, proyectada entre el 2015 y 2020 (en Estados Unidos), estará caracterizada por un mayor flujo de información permitiendo la programación automática del tiempo de carga. En la tercera generación, proyectada entre el 2020 y el 2025, el vehículo puede ser empleado para entregar energía al hogar y se espera un flujo básico V-R, donde la generación local proveniente de aerogeneradores o energía fotovoltaica se almacene en la batería del PVE y luego se suministre a la red eléctrica. En la cuarta generación, proyectada desde el 2025, la red eléctrica puede emplear las baterías de los PVEs para almacenamiento distribuido. Esto implica lograr una adecuada coordinación en el flujo de la información de toda la red eléctrica, debido a la gran cantidad de vehículos que se esperan para la época.

Tabla 1. Progresión de la interacción PEV–Red eléctrica

PEV	Flujo de Energía	Interacción entre PEV–Red
1ª Generación	R-V	Comunicación mediante la red de telefonía celular Programación manual de intervalos de carga
2ª Generación	R-V	Información en tiempo real de emisiones de CO2 y costos de la energía Programación inteligente de la carga.
3ª Generación	R-V y V-L	El PVE puede proveer energía a una o varias cargas aisladas o a todo el hogar a través de un interruptor coordinado localmente.
	R-V y V-R básico	La generación local puede almacenarse en la batería del vehículo y entregarse a la red eléctrica.
4ª Generación	R-V y V-R	El PVE es una fuente de energía auxiliar y puede ser empleado por la red eléctrica como fuente de almacenamiento distribuido.

Fuente: (Tuttle &amp; Baldick, 2012)

Puede observarse que los desarrollos esperados en Smart Grid solo serán posibles con una adecuada infraestructura de telecomunicaciones.

### Tecnologías de comunicaciones en Smart Grid

La red inteligente será el soporte para una amplia gama de nuevas aplicaciones y servicios para una gestión eficiente de la energía en el sistema.

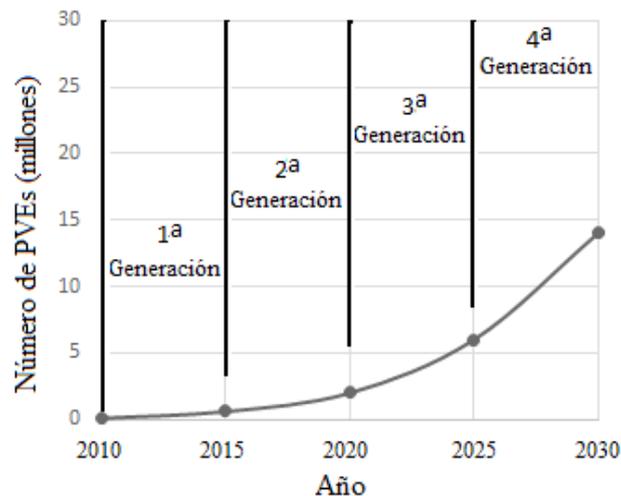


Figura 4. Proyección de PHEVs en las carreteras de Estados Unidos.

Fuente: NAP (National Academies Press)

Los sensores y dispositivos de medición en Smart Grid generarán gran cantidad de datos provenientes de los usuarios y dispositivos de campo, que pueden convertirse en información útil empleando técnicas de minería de datos y gestión del conocimiento. Esta información permitirá monitorear el estado de los equipos y analizar patrones de consumo de la energía por usuario o zona geográfica. Información que puede aprovecharse para el diseño y proyección de todo sistema energético.

Smart Grid requiere una infraestructura de comunicación que cumpla con ciertos requerimientos de retardo, confiabilidad, escalabilidad y seguridad. La arquitectura de comunicación de Smart Grid está conformada por varios segmentos: Red de Área del Hogar (Home Area Network, HAN), Red de Área de Vecindario (Neighborhood Area Network, NAN), Red de Área Amplia (Wide Area Network, WAN) y Red de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network, MAN). Diferentes tecnologías de comunicación cableada e inalámbrica se han propuesto para los diferentes segmentos. En la *Figura 5. Arquitectura de red totalmente distribuida*, se presenta una arquitectura de comunicaciones totalmente distribuida para Smart Grid. La red de comunicaciones en Smart Grid es un típico ejemplo de un sistema ciber-físico, en el que gran cantidad de datos de cientos de miles de contadores inteligentes son recogidos y procesados. La escalabilidad es uno de los temas más importantes para la implementación de AMI en la red eléctrica inteligente y se han propuesto varias alternativas.

En (Zhou, Hu, & Qian, 2012) se investiga la escalabilidad de diferentes arquitecturas de comunicación para AMI en Smart Grid. Para cada arquitectura se formula un problema de optimización y se obtiene las soluciones para minimizar el coste total del sistema que considera tanto el ancho de banda, la distancia y el costo de implementación del Sistema de Gestión de los Datos de Medición (Meter Data Management, MDM).

En (Niyato & Wang, 2012) se propone un esquema de comunicación cooperativa para la recopilación de datos medidos en Smart Grid. En este caso, múltiples comunidades deciden estratégicamente como transmitir los datos hacia la unidad concentradora y luego al sistema MDM (ver *Fig. 6: Transmisión*

*cooperativa, recolección datos medidos*), de forma que el coste de transmisión individual (costo energético y costo de transmisión) se reduzca al mínimo.

El modelo de juego no cooperativo se ha formulado y el equilibrio de Nash se ha considerado como la solución en este problema. Se ha encontrado que puede haber un número infinito de equilibrios de Nash, y la política de equilibrio de selección simple se aplica para obtener el coste total mínimo de todas las comunidades. Queda abierto para futuras investigaciones probar este modelo de juego con diferentes restricciones.

Además de la escalabilidad la red de comunicaciones en Smart Grid debe garantizar un retardo mínimo para responder a una posible falla o cambio, además de proporcionar seguridad y confiabilidad en el transporte de la información.

Definir la tecnología en cada segmento en Smart Grid es otro gran desafío. Al respecto, es necesario actualizar la red de comunicación del sistema eléctrico introduciendo nuevas tecnologías de comunicación que ofrecen mayor ancho de banda, como por ejemplo la fibra óptica y enlaces inalámbricos de alta capacidad. Sin embargo, para muchas empresas de servicios públicos, con infraestructuras que cubren cientos de kilómetros, el costo de este proceso de modernización podría ser un impedimento.

A nivel de HAN el requerimiento de ancho de banda no es exigente pero se requiere escalabilidad y cobertura. Al respecto puede usarse tecnologías como Bluetooth para comunicar dispositivos en distancias cortas.

También, tecnologías como ZigBee, PLC (Power Line Communications) y WiFi pueden emplearse en redes de sensores para interconectar diferentes dispositivos dentro del hogar. El transporte de las lecturas de los medidores de consumo eléctrico requiere de un mayor ancho de banda para disminuir la latencia y proporcionar respuestas en tiempo real. Hay varias opciones tecnológicas como son: Red Inalámbrica Móvil 4G LTE/GSM o WiMAX (Red de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), Red Híbrida Fibra-Coaxial (HFC) o Línea de Abonado Digital (DSL). La opción más confiable y escalable es el empleo de una Red Óptica Pasiva (Passive Optical Network, PON).

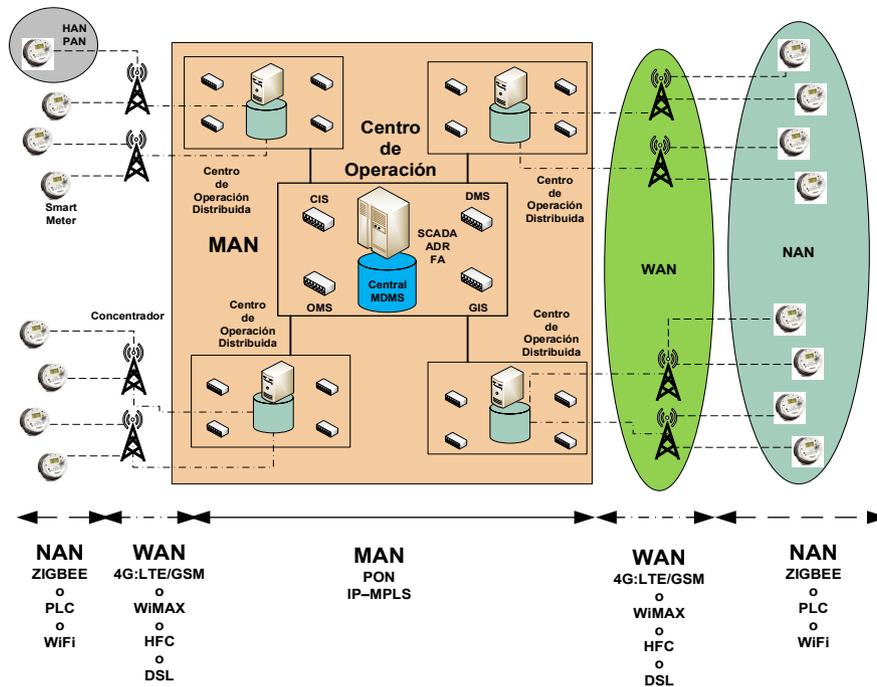


Figura 5. Arquitectura de red totalmente distribuida  
Fuente: Autores.

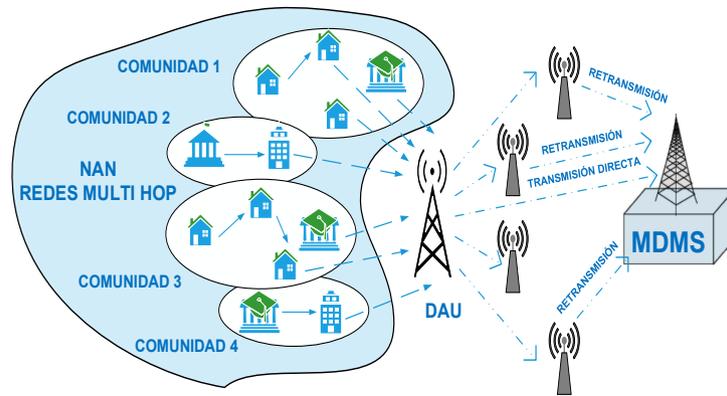


Fig. 6: Transmisión cooperativa, recolección datos medidos  
Fuente: Autores

Tabla 2. Requerimientos de potenciales redes de comunicaciones para Smart Grid.

Tipo de Red	Alcance	Requerimientos en la Tasa de Datos	Potenciales Tecnologías
HAN	Decenas de metros 0 – 50 m	Depende de la aplicación, generalmente baja tasa de bit para control e información.	ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC
NAN	Cientos de metros 0 – 700 m	Depende de la densidad en el nodo de la red (capacidades de decenas a cientos de Kbps por nodo).	ZigBee, Wi-Fi, PLC, Celular
WAN	Decenas de Kilómetros	Dispositivos de Alta capacidad tal como es un router / switch de alta velocidad (capacidades entre cientos de Mbps y Gbps por nodo).	Ethernet, Microonda, WiMax, 3G-4G/LTE, PON

Fuente: (Fan, y otros, 2011)

En (Patel, Aparicio, y otros, 2011), (Overman & Sackman, 2010), (Gungor, y otros, 2011), (Gao, Xiao, y otros, 2012), (Galli, Scaglione, & Wang, 2010), (Feng & Yuexia, 2011), (Fan, y otros, 2011) se proponen y estudian arquitecturas para *Smart Grid*. En (Kansal & Bose, 2011), (Jun-ping, Wan-Xing, y otros, 2002), e (IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation, 2005) se presentan propuestas

para la red de comunicaciones en *Smart Grid* para los componentes de generación y transmisión hasta las subestaciones.

En la *Tabla 2. Requerimientos de potenciales redes de comunicaciones para Smart Grid*, se resumen los requerimientos y posibles tecnologías de telecomunicaciones en los diferentes segmentos de *Smart Grid*.

Tabla 3. Aplicaciones sobre una *Smart Grid* y sus requerimientos de comunicaciones

Aplicación	Latencia	Ancho de Banda	Tiempo-Real
AMI	Alta	10 Kbps/mensaje/nodo	Bajo
ADR	Media-Alta	14–100 Kbps/nodo	Medio
PEV	Media-Alta	9.6–56 Kbps	Medio – Alto

Fuente: (Patel, Aparicio, Tas, Loiacono, & Rosca, 2011)

En la *Tabla 3. Aplicaciones sobre una Smart Grid y sus requerimientos de comunicaciones* se presentan las aplicaciones típicas en *Smart Grid* con sus respectivos requerimientos.

Una técnica para realizar mediciones en el sistema eléctrico se conoce como Unidad de Medición Fasorial (PMU), que utiliza el concepto de Sincrofasores. Con esta técnica se realizan medidas sincronizadas en todo el sistema. La sincronización se realiza por medio de satélites con relojes de alta precisión. El voltaje medido localmente se compara con una onda de referencia global, obteniendo información fasorial de todo el sistema que permite realizar mediciones. Como mínimo se requieren 26 palabras de 16 bits en formato IEEE PC37.118. La tasa de transmisión requerida puede calcularse empleando la siguiente ecuación (1):

$$bps = 1.2 \cdot (n \cdot L \cdot f) \quad (1)$$

Donde  $nn$  es la longitud del mensaje en palabras,  $L$  es el número de bits por palabra (normalmente 12 bits: 1 bit de inicio, 8 bits de datos, 2 bits de parada, 1 bit de paridad),  $f$  es la frecuencia de mensajes y el factor 1.2 es obtenido a partir de pruebas experimentales.

En la *Figura 7. Ancho de Banda en función del Número de PMUs* se presenta el ancho de banda requerido (mediante concentrador centralizado o distribuido) en función del número de PMUs que se encuentran desde los puntos de generación hasta las subestaciones. En este tramo se admiten retardos en el tiempo de transmisión de los datos en valores que oscilan entre 2–100 ms, considerando la latencia generada por el procesamiento de la información en valores que están alrededor de los 10–100 us. Estos tiempos deben cumplirse para garantizar una respuesta en un tiempo adecuado ante un fallo. En este caso, los equipos de campo deben controlar el problema en un tiempo menor a cuatro ciclos de la onda fundamental, luego de ocurrido el fallo, para evitar daños en los equipos de generación, transformación y operación. Para una frecuencia de 60 Hz (período 16.667 ms), la falla debería solucionarse en un tiempo no superior a 67 ms, en este tiempo deben coordinarse las protecciones, y si fuere necesario transferir el flujo de potencia. Estas acciones estarían coordinadas por un Sistema Gestor de Energía (EMS) y Automatización de Alimentadores (FA).

En lo que respecta a la pila de protocolos más usados para las comunicaciones en Alto Voltaje, se recomienda el uso de UDP/IP/Ethernet, teniendo en la capa de aplicación información con una tasa de bits constante (Constant Bit Rate, CBR). En la *Tabla 4* se indican los principales protocolos sugeridos por IEC para *Smart Grid*.

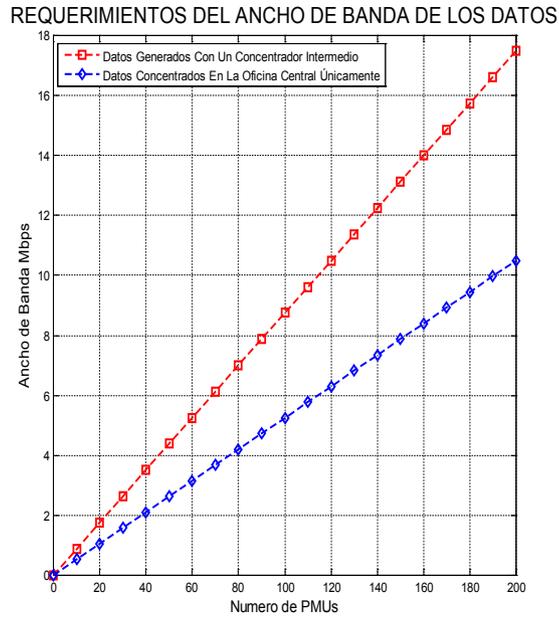


Figura 7. Ancho de Banda en función del Número de PMUs  
Fuente: Autores

Para el diseño de una red inteligente son importantes las herramientas de simulación, que permiten plantear y evaluar diferentes escenarios. En (Anderson, y otros, 2012) se plantea el diseño de subestaciones mediante el Programa GridSim® (Software de código abierto bajo la licencia GPL) que es un Toolkit (GridStat®) al programa TSAT™. En (Patel, Aparicio, Tas, Loiacono, & Rosca, 2011) se muestra la utilidad del programa OPNET® Modeler (Proporciona su software de forma

gratuita a las universidades de todo el mundo para la investigación académica y la enseñanza), para realizar la simulación de redes de comunicaciones tanto inalámbricas como guiadas, para el diseño de la red de telecomunicaciones y la gestión de la energía eléctrica. Estas herramientas permiten realizar la simulación y optimización previa a la realización de una implementación o considerar una actualización tecnológica.

Tabla 4. Estándares en Smart Grid

ESTÁNDARES PARA SG	
IEC/TR 62357	Arquitectura Orientada al Servicio (SAO)
IEC 61970	Modelo de Información Común (CIM) / Gestión de Energía
IEC 61850	Automatización de Subestaciones
IEC 61968	Modelo de Información Común (CIM) / Gestión de Distribución
IEC 62351	Seguridad
IEC 62056	Intercambio de datos para la lectura de contadores, tarifas y control de carga
IEC 61508	Seguridad funcional de sistemas eléctricos / electrónicos / electrónicos programables relacionados con la seguridad de los sistemas

Fuente: <http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>

## Conclusiones

El consumo de energía en los últimos años no ha disminuido, más bien la tendencia es a mantenerse; alguna rebaja en el consumo se ha logrado por parte de la comunidad Europea, gracias al impulso de campañas por la utilización de las denominadas Energías Verdes o Amigables con el Medioambiente, los países de la Región Andina no escapan ante esta problemática, por ello se ve la necesidad de actualizar las redes de energía eléctrica hacia *Smart Grid*, a través de una mayor integración de las TIC. Esta actualización permitirá un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía alternativa, una más rápida respuesta a los fallos o cambios en los perfiles de consumo, y una mejor adaptación a la masificación de los vehículos eléctricos.

La evolución hacia *Smart Grid* es un proceso de transformación que tomará un largo tiempo, posiblemente entre 15 a 20 años para los países de la Región Andina. Esta implementación involucraría algunos agentes, como los usuarios y entes comercializadores; creando de pronto programas de divulgación de la información concerniente a gestión y uso eficiente de la energía.

El SEP tendrá que sufrir un giro total, dejando de lado la estructura centralizada, la cual tiene los inconvenientes de ser una arquitectura, muy poco escalable, complicada de reconfigurar en lapsos de tiempos cortos, dependiente de pocas centrales de generación de gran tamaño que a veces funcionan en menos del 100 % de su capacidad debido a la falta del recurso climático que es inestable, o centrales que en cambio provocan daños al clima por generar gases de efecto invernadero, una solución promisoriosa y eficiente que daría escalabilidad y seguridad, y que sea amigable con el medioambiente, sería utilizar una infraestructura con una arquitectura totalmente distribuida mediante el concepto de micro redes, en el cual se aprovecharía muy bien las fuentes de energía renovables.

Por otro lado, AMI permitirá optimizar la operación y comercialización del sistema eléctrico, permitiendo a las empresas de servicios públicos implementar una monitorización, y control directo en la gestión de la demanda y responder rápidamente a sus variaciones.

La masificación de los vehículos eléctricos, tendrá un alto impacto en la red eléctrica, al variar los perfiles de consumo y al presentar la posibilidad de usar las baterías de los PVEs como fuentes auxiliares de energía, en este estudio se presentó una proyección de los vehículos sobre las carreteras de Estados Unidos, y como podrían estos actuar con la red de energía.

Algunas aplicaciones requieren que la red eléctrica soporte un flujo bidireccional de potencia, de forma que los usuarios puedan interactuar con la misma al poder entregar energía al sistema. Adicionalmente, se requiere un flujo bidireccional de información entre los usuarios finales y los proveedores del servicio. Por esta razón la red de comunicaciones en *Smart Grid* juega un papel primordial, garantizando ancho de banda, latencia, confiabilidad, seguridad y privacidad, en este trabajo se presenta posibles arquitecturas a ser utilizadas en las diferentes etapas de una *Smart Grid*, como son la red de acceso y la red metro, adicional se muestran técnicas a utilizar en la recolección de los datos medidos, futuros trabajos estarían encaminados a dos ámbitos muy importantes, el primero sería a cómo realizar la asignación y coordinación de los recursos energéticos dentro de la *Smart Grid*, y la segunda tendría una relación directa con la forma de como plantear arquitecturas de telecomunicaciones y sus respectivas topologías que soporten a las aplicaciones de la *Smart Grid*.

## Agradecimientos

Los resultados fueron obtenidos bajo el Proyecto de Investigación “Red de Comunicación Multiservicio con Soporte a Redes Inteligentes (*Smart-Grid*)” financiado por COLCIENCIAS ([www.colciencias.gov.co](http://www.colciencias.gov.co)), la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia y la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

## Referencias

---

- Anderson, D., Zhao, C., Hauser, C., Venkatasubramanian, V., Bakken, D., & Bose, A. (2012). Intelligent Design Real-Time Simulation for Smart Grid Control and Communications Design. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 10(1), 49-57.
- Bouhafs, F., Mackay, M., & Merabti, M. (2012). Links to the Future: Communication Requirements and Challenges in the Smart Grid. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 10(1), 24-32.
- Bu, S., Yu, F., Liu, P., & Zhang, P. (2011). Distributed scheduling in smart grid communications with dynamic power demands and intermittent renewable energy resources. 1-5.
- Chen, K., Yeh, P., Hsieh, H., & Chang, S. (2010). Communication infrastructure of smart grid. 1-5.
- Commission, E., & others. (2006). European SmartGrids technology platform: vision and strategy for europe's electricity networks of the future., 22040, pág. 37 pp.
- Fan, Z., Kulkarni, P., Gormus, S., Efthymiou, C., Kalogridis, G., Sooriyabandara, M., . . . Chin, W. (2011). Smart Grid Communications: Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*(99), 1-18.
- Feng, Z., & Yuexia, Z. (2011). Study on smart grid communications system based on new generation wireless technology. 1673-1678.
- Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2010). Power line communications and the smart grid. 303-308.
- Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Liang, W., & Chen, C. (2012). A survey of communication/networking in Smart Grids. *Future Generation Computer Systems*, 28(2), 391-404.
- Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. (2011). Smart Grid Technologies: Communications Technologies and Standards. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*(99), 1-11.
- IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation. ( de 2005). *IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation*(Print: ISBN 0-7381-4502-5 SS95283 PDF: ISBN 0-7381-4503-3 SS95283), 0\_1 -24.
- Ikki, S., Amin, O., & Uysal, M. (2010). Performance Analysis of Adaptive L-QAM for Opportunistic Decode-and-Forward Relaying. 1-5.
- Jun-ping, S., Wan-Xing, S., Sun-an, W., & Wu, K. (2002). Substation automation high speed network communication platform based on MMS+ TCP/IP+ Ethernet. 2, 1296-1300.
- Käbisch, S., Schmitt, A., Winter, M., & Heuer, J. (2010). Interconnections and communications of electric vehicles and smart grids. 161-166.
- Kansal, P., & Bose, A. (2011). Smart grid communication requirements for the high voltage power system. 1-6.
- Marris, E. (July de 2008). Upgrading The Grid. *News Feature*, 454, 570 - 573.
- Niyato, D., & Wang, P. (2012). Cooperative Transmission for Meter Data Collection in Smart Grid. *IEEE Communications Magazine*, 50(4), 90.
- Overman, T., & Sackman, R. (2010). High assurance smart grid: Smart grid control systems communications architecture. 19-24.
- Patel, A., Aparicio, J., Tas, N., Loiacono, M., & Rosca, J. (2011). Assessing communications technology options for smart grid applications. 126-131.
- Seo, D., Lee, H., & Perrig, A. (2011). Secure and Efficient Capability-Based Power Management in the Smart Grid. 119-126.
- Shahraeini, M., Javidi, M., & Ghazizadeh, M. (2010). A new approach for classification of data transmission media in power systems. 1-7.
- Tuttle, D., & Baldick, R. (2012). The Evolution of Plug-in Electric Vehicle-Grid Interactions. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 3(1), 500-505.
- Xiao, Y. (2012). *Communication and Networking in Smart Grids*. New York: {CRC} Press.
- Yang, Y., Hu, H., Xu, J., & Mao, G. (2009). Relay technologies for WiMAX and LTE-advanced mobile systems. *Communications Magazine, IEEE*, 47(10), 100-105.
- Zhou, J., Hu, R., & Qian, Y. (2012). Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid. 1-12.

## Sobre los autores

---

### **Arturo G. Peralta Sevilla**

PhD(e). Ingenierías área Telecomunicaciones,  
Universidad Pontificia Bolivariana. Docente Tiempo  
Completo Universidad Politécnica Salesiana.  
Investigador Grupo GITEL, Cuenca, Ecuador.  
aperaltas@ups.edu.ec

### **Ferney Amaya-Fernández**

PhD. Ingeniería área Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana. Docente Tiempo  
Completo. Investigador Grupo GIDATI. Medellín,  
Colombia.  
ferney.amaya@upb.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la  
Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.