

Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte

Smart Grid: ICT and Electric Energy Network Upgrading – State of Art

Carlos Andrés Díaz Andrade

Jefe de innovación y nuevos proyectos

Integratic SAS, Cali (Colombia)

andres.diaz@integratic.net

Juan Carlos Hernández

Ingeniero de desarrollo

Integratic SAS, Cali (Colombia)

juan.hernandez@integratic.net

.....

Fecha de recepción: Agosto 23 de 2011

Fecha de aceptación: Septiembre 1 de 2011

Palabras clave

Smart Grid; generación distribuida; fuentes de energía renovables; Gestión de la red eléctrica; independencia de combustibles fósiles; vehículos eléctricos; gases efecto invernadero; TIC.

Keywords

Smart Grid; distributed generation; renewable energy; grid management; independence from fossil fuels; electric vehicles; greenhouse gases; ICT.

Colciencias tipo 3

Resumen

En el mundo crece el interés por desarrollar políticas y regulaciones que incentiven la creación de conciencia social respecto de los gases causantes del efecto invernadero. Muchos gobiernos quieren, además, reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Las tecnologías denominadas Smart Grid podrían apoyar estos propósitos al disminuir las emisiones de carbono mediante la gestión de la demanda de energía eléctrica. Además del beneficio medioambiental, su implementación mejora la eficiencia de las redes de transmisión y distribución energética y permite la integración de fuentes de energía renovable distribuidas. La infraestructura de la red eléctrica inteligente debe prever requerimientos futuros y aprovechar las tecnologías que surjan. Con la masificación del uso de vehículos eléctricos, la red deberá poder responder al enorme incremento de la demanda. Todas esas metas son importantes en muchos sectores, pero particularmente para las TIC, pues su desarrollo permitirá a las redes de energía eléctrica volverse "más inteligentes".

Abstract

In the world is growing interest in developing policies and regulations that encourage the creation of social awareness of greenhouse gas emissions. Many governments also want to reduce dependence on fossil fuels. Called Smart Grid technologies can support these goals by reducing carbon emissions by managing energy demand. In addition to environmental benefits, its implementation improves the efficiency of transmission and power distribution, and allows the integration of distributed renewable energy sources. The infrastructure of the Smart Grid should provide future requirements and take advantage of emerging technologies. With the mass use of electric vehicles, the network must be able to respond to the enormous increase in demand. These actions are important in many sectors, but particularly for ICT, as their development is to enable power grids to become "smarter".

I. Introducción

Las definiciones y la terminología de los entes a cargo de la normalización y el desarrollo de las redes eléctricas varían levemente. Sin embargo, el concepto general de redes *smart* o inteligentes hace referencia a una red de energía avanzada, acorde con los adelantos y tendencias del siglo XXI, que incorpora los servicios y beneficios de las tecnologías de comunicación y computación digital a una infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica, y que se caracteriza por un flujo bidireccional de energía e información que incluyen equipos instalados en la parte de la red del cliente y sensores asociados (Hiskens, 2010; Boswarthick, Elloumi, & Ballot, 2010).

Existe consenso respecto de su objetivo principal: el proyecto Smart Grid aspira a desarrollar una red eléctrica más eficiente y fiable, que mejore la seguridad y calidad del suministro, de acuerdo con los avances de la era digital (Boal, 2010).

Según estudios de la iniciativa eléctrica Galvin, en los Estados Unidos las tecnologías Smart Grid disminuirán los costes en el suministro de energía eléctrica y reducirán la necesidad de una inversión masiva en infraestructura en al menos los próximos veinte años con una grilla eléctrica de mayor capacidad (Galvin & Yeager, 2008). La implementación generalizada de tecnología que permita a los usuarios controlar fácilmente su consumo de energía podría, además, incidir en la reducción de los precios para todos los consumidores (Electricity Advisory Committee [EAC], 2008).

En el aspecto ambiental existe un gran interés de los países en desarrollar políticas y reglamentaciones que incentiven la creación de conciencia social respecto de las consecuencias de los gases de efecto invernadero. El problema radica en el combustible utilizado por las plantas de generación de energía tradicionales y se produce durante los picos de demanda que obligan a activar plantas especiales para poder suplir esas necesidades adicionales de energía. Esas plantas se utilizan únicamente durante esos períodos, con los sobrecostos que ello supone —que repercute directamente en las facturas—. Un dato muy significativo: en los Estados Unidos, un país desarrollado, el 40% de las emisiones de dióxido de carbono provienen de la generación eléctrica, mientras que únicamente el 20% son causadas por el transporte (Kaplan, 2009). Esto presenta un enorme desafío para la industria del sector eléctrico en términos del cambio climático global. De acuerdo con el laboratorio Nacional de energías renovables (NREL), “Las empresas de servicios públicos son presionadas en muchos frentes para que adopten prácticas empresariales que respondan a las preocupaciones del medio ambiente en el mundo” (U.S. Department of Energy [DOE], 2008, p.21).

En este sentido, la aplicación de las tecnologías Smart Grid podría reducir las emisiones de carbono por medio del mejoramiento de la eficiencia, de la respuesta a la demanda y de la gestión de la carga de la red eléctrica. La motivación es grande, ya que, por ejemplo, si una red como la estadounidense mejorara su eficiencia en sólo

un 5%, el ahorro de energía equivaldría a eliminar permanentemente el combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero de 53 millones automóviles. Smart Grid también reduciría al mínimo los costos de generación eléctrica en horas pico. Para conseguir estos objetivos es necesaria la contribución tanto de las compañías eléctricas como de los usuarios. Las primeras deben dar los pasos necesarios para reemplazar una producción basada en el carbono por otra con base en energías renovables; los segundos deben incluirse en la solución a través de medidas de ahorro energético, para lo que deben contar con la información y los medios apropiados.

La red eléctrica transporta la energía eléctrica en alta tensión mediante la gestión de las infraestructuras eléctricas que forman la red de transmisión y enlazan las centrales de generación con las redes de distribución a los consumidores. La energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades, lo que implica que su producción y consumo deben ser iguales en todo momento; que debe existir un equilibrio constante de la producción con la demanda. Esa es la otra gran función de red eléctrica: la de operador del sistema, en la que debe de prever el consumo y supervisar en tiempo real las instalaciones de generación y transporte, de forma que las centrales produzcan la demanda real de los consumidores (Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones [OIETIT], 2011). Para esta operación se dispone de centros de control que monitorizan el estado de la red y sus parámetros eléctricos a través de una red de telecomunicaciones que gestiona principalmente la red de transporte. Pero también ha habido modificaciones tecnológicas en el sector de la operación y mercado eléctrico discutidas en OIETIT (2011). Sin embargo, desde los puntos de distribución hacia el consumidor doméstico final queda mucho por hacer, y hay que tener en cuenta que su participación en las redes inteligentes del futuro será un factor clave. En la actualidad, en muchos países del mundo se ha iniciado la sustitución de los contadores tradicionales analógicos por nuevos contadores inteligentes.

Aunque en la actualidad a menudo las redes inteligentes se asocian solamente con el despliegue de contadores inteligentes y con una comunicación entre una entidad de control centralizada y los usuarios, su uso permitiría poner en práctica controles de respuesta a la demanda de la energía eléctrica. Pero ese es sólo uno de los servicios relacionados con las redes inteligentes. Los medidores inteligentes instalados actualmente por algunas empresas de servicios públicos proporcionan funcionalidades muy limitadas y no tienen la capacidad de lograr por sí mismos todos los objetivos deseados relacionados con la implantación de redes inteligentes. Las redes que sólo agregan contadores inteligentes a las tecnologías tradicionales a veces son llamadas Smart Grid. Sin embargo, una red más avanzada y verdaderamente inteligente, una Smart Grid 2.0 comprendería otras tecnologías, como la utilización de controles autónomos en el lado del usuario final, la generación y el almacenamiento de energía distribuida y las arquitecturas de potencia flexibles (Kwasinski, 2010).

II. Aspectos claves de Smart Grid

Para la implementación de Smart Grid es relevante entender cómo las tecnologías de redes inteligentes pueden ser integradas con el fin de producir un sistema benéfico tanto para los proveedores de servicios públicos como para los operadores de las TIC y los usuarios, abriendo de esta manera nuevos mercados y generando nuevos modelos de negocio.

En dicha integración se puede decir que Smart Grid no es sólo un concepto sino un esquema que combina diversas tecnologías, especialmente aquellas vinculadas a la comunicación y al control, para transformar la actual red eléctrica en un modelo de generación distribuido, lo que aumenta además, su confiabilidad, flexibilidad y disponibilidad y reduce el costo de la energía. Esas metas son importantes en muchas aplicaciones, particularmente en la industria de las TIC (Romatech, 2010), en que los aspectos más interesantes y prometedores en la evolución hacia una red más inteligente son el soporte de flujo de energía bidireccional, la capacidad de interacción directa con el usuario, el desarrollo de sistemas de medición avanzada, la ciber-seguridad y el soporte de carga de automóviles eléctricos y su uso como gran sistema de almacenamiento distribuido.

A. Generación distribuida y el paradigma bidireccional

Una de las características más importantes que diferencia una red eléctrica inteligente de una tradicional es su capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional, es decir, de pasar del esquema en que el flujo de energía va solo desde las grandes plantas de generación hacia los usuarios finales, particulares o industriales (sección a de la Figura 1) a otro que incorpora y aprovecha la capacidad de almacenamiento y generación distribuida, con un rol activo para los usuarios, en el que son capaces de proveer energía a otros usuarios (sección b de la Figura 1).

Además, en un sistema que permita la comunicación bidireccional entre el consumidor final y las compañías eléctricas la información proporcionada por los consumidores es utilizada por las compañías para permitir una operación más eficiente de la red eléctrica. Así mismo, Verschueren & Haerick (2010) indican que dicha información permitirá ofrecer nuevos servicios a los clientes de forma complementaria a la propia energía eléctrica, tales como: monitoreo en línea del consumo (i.e Google Power Meter), servicios de carga de vehículos eléctricos, negociación de energía con los sistemas de almacenamiento distribuidos y de generación renovable, entre otros.

Que los usuarios se conviertan en proveedores es posible gracias al desarrollo de tecnologías de generación de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica y la eólica –al estar estas pequeñas generadoras integradas a la red de distribución–, y a los adelantos de los sistemas de microalmacenamiento residencial distribuido: pequeñas unidades de almacenamiento residencial con capacidad de unos pocos kW/h (Hussein, Harb, Kutkut, Shen, & Batarseh, 2010).

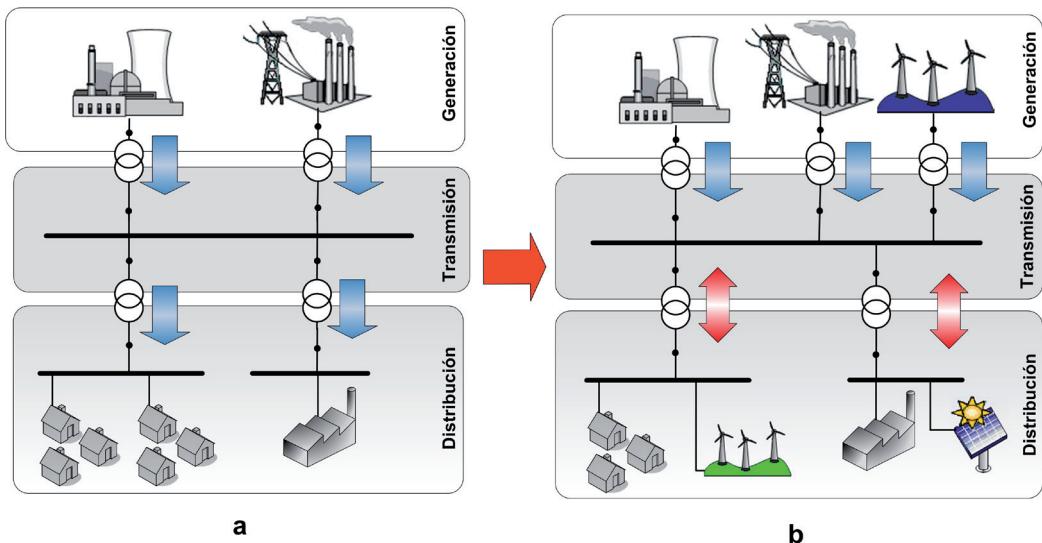


Figura 1. Sistemas de energía eléctrica tradicional (a) y de próxima generación (b).

Adaptado de: The Top-Bottom Structure y The Bidirectional Paradigm (Coll-Mayor, 2009, pp.5-6).

Un factor importante a considerar en el diseño de una infraestructura de Smart Grid es la condición intermitente y variable inherente a las fuentes de energía renovable. Su aprovechamiento depende de las condiciones climáticas. Para encarar este desafío, Ipakchi & Farrokh (2009) describen que en la actualidad existen desarrollos y lineamientos de diseño y posibles soluciones junto a la aplicación de herramientas de predicción de condiciones climáticas que permiten la integración y penetración de estas fuentes en la operación de la grilla de potencia.

B. Interactividad

Históricamente las interacciones del cliente en la gestión de su propio consumo de energía se han limitado al control voluntario de la demanda y a programas de control directo de carga, como por ejemplo el cambio a bombillos ahorreadores o luminarias LED (McNaughton, G. & Saint, R., 2010). Con Smart Grid es posible que los usuarios o dispositivos instalados en el lado del cliente tomen decisiones para controlar la demanda que se adapten mejor a sus necesidades financieras y sociales.

Se estima que tal como ocurrió con Internet, la red eléctrica será interactiva tanto para las entidades de generación de energía como para los actores del lado del consumo. En 2020 las empresas de servicios energéticos permitirán a toda persona tener acceso a la prestación de otros servicios, como la gestión de la demanda. Como efecto de los

contadores inteligentes, las tecnologías de control electrónico, los medios modernos de comunicación y la mayor conciencia de los usuarios, la gestión local del consumo de electricidad jugará un papel clave en la prestación de nuevos servicios que crearán valor para las partes involucradas (European Commission, 2006).

En este contexto la medición y gestión de los servicios tendrá una consecuencia fundamental en la evolución de la demanda de la energía eléctrica. Por esta razón, elementos tales como los contadores electrónicos, los sistemas de gestión automática de contadores y lo que en principio se denomina las redes HAN (*Home Area Network*), junto con otros sistemas de comunicación y control que se utilizan en las redes de transmisión y distribución, servirán de apoyo para crear una herramienta valiosa para la integración de los procesos de negocio en la gestión en tiempo real de la cadena de valor entre los *stakeholder* de Smart Grid.

C. Advanced Metering Infrastructure (AMI)

La infraestructura de medición avanzada le apuesta a incorporar a los consumidores al sistema eléctrico por medio del despliegue de nuevas redes de comunicaciones y sistemas de base de datos, y proporcionará beneficios importantes tanto a las compañías eléctricas como a los consumidores. AMI consiste en un sistema de comunicación bidireccional que involucra medidores "inteligentes" y otros dispositivos de gestión de la energía. Esto permite a las empresas responder más rápidamente a los posibles problemas, los servicios de conexión/desconexión, y comunicar en tiempo real los precios de la electricidad, entre otras funciones (Hart, 2008). Las señales de los precios proporcionan a los consumidores incentivos financieros para reducir su consumo de electricidad.

Además, las compañías eléctricas pueden enviar señales de precios a termostatos y electrodomésticos inteligentes para alertar sobre próximos períodos de alto costo. Una opción es que el mismo consumidor determine la respuesta y la acción a tomar; otra, que dispositivos inteligentes pueden disminuir el uso de los electrodomésticos hasta que el período de alto costo (hora pico) haya terminado, o cambie el uso automáticamente y lo mueva a períodos de menor costo.

Un elemento importante en la infraestructura AMI es el *Automatic Meter Reading* (AMR). Aunque muchos de estos lectores soportan elementos de Smart Grid, no alcanzan para desarrollar todo su potencial principalmente porque al estar soportados en el estándar ANSI C.12.22 se centran en proporcionar mejoras en la flexibilidad e independencia de diferentes arquitecturas de comunicación de datos de medición, usando la red celular, redes inalámbricas de bandas no licenciadas, líneas de potencia o satélites. Para alcanzar el pleno potencial de Smart Grid, la red de comunicaciones debe ser compatible con los protocolos y aplicaciones de no medición. Por lo tanto, el mayor desafío está en extender por completo IP como protocolo de la capa de unificación

de todos los segmentos de Smart Grid, incluidas las redes de AMI y sus dispositivos finales. Estas y otras limitaciones son tratadas por Flynn (2007). Ambos esquemas, el de generación y el de almacenamiento distribuido, sumados a ciertas capacidades de control, darán acceso a una serie de nuevas funcionalidades, aplicaciones y modelos de negocio que van mucho más allá de la iniciativa actual de algunas empresas del sector energético, que se limitan a reemplazar los contadores en casas y negocios por medidores inteligentes para tareas de monitoreo. Mahmood, Aamir y Anis (2008) describen los lineamientos y las técnicas de diseño e implementación de un sistema AMR que provee beneficios importante de monitoreo y control, como esquema inicial de Smart Grid (Hart, 2008).

D. Seguridad cibernética

Como se mencionó, Smart Grid conlleva la integración de sistemas computacionales, algo que podría traer nuevos riesgos de ciberseguridad a los sistemas de gestión, generación y distribución de la grilla inteligente.

Según el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, EPRI (2009), uno de los mayores desafíos que enfrenta el desarrollo de redes inteligentes se relaciona con la seguridad cibernética de los sistemas. Según el Informe de EPRI: "La seguridad cibernética es un problema crítico debido a la posibilidad cada vez mayor de ataques cibernéticos y los incidentes críticos en contra de este sector, ya que se vuelve cada vez más interconectado" (Metke & Ekl, 2010, p. 99).

El primer paso hacia la protección de Smart Grid contra las violaciones de seguridad involucra un análisis de riesgos. En una eventual amenaza del sistema de potencia eléctrica los riesgos más importantes serían la interrupción de la grilla eléctrica, la pérdida de disponibilidad del sistema y la posibilidad de perder el control de ciertos aspectos de la grilla.

Además de enfrentar apagones y pérdida de disponibilidad, es necesario considerar las consecuencias de las fallas de la grilla. En el caso de los apagones forzados industrias que emplean procesos continuos, como las refinerías petroquímicas y la manufactura farmacéutica, entre otras, podrían verse muy afectadas. Se pueden presentar también daños en equipos sensibles en situaciones en que la electricidad abastece funciones centrales de ventilación o enfriamiento (Metke & Ekl, 2010).

Otro aspecto de la seguridad cibernética a tener en cuenta es la privacidad de los usuarios. El uso indebido puede llevar a determinar el equipamiento que existe en un hogar y sus patrones de uso; el número de personas que viven en un hogar y sus costumbres (hora de levantarse y acostarse, comidas, lugares de la vivienda en los que pasan más tiempo); y la presencia de aparatos médicos que permitirían inferir problemas de salud en los habitantes del hogar (información clasificada con el máximo grado de confidencialidad, de acuerdo con las leyes de protección de datos) (Gómez, 2011).

Así, estos posibles usos no deseados de la información pueden añadir más elementos al debate de la cuestión de la privacidad, tema bastante abordado por el uso de Internet, por la existencia de un gran número de empresas que tratan de trazar la actividad de los usuarios mediante técnicas tales como las cookies o el *fingerprinting* de dispositivos (huella única que se puede conseguir mediante el análisis de la información que se envía al visitar una página Web). El tema de la privacidad en las redes eléctricas probablemente se situará a un nivel parecido al de la privacidad en Internet y será objeto de especial atención de los entes reguladores (Katz, 2010a). Por ejemplo, agencias como el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología) han publicado un volumen con recomendaciones sobre privacidad como parte de un estudio de ciberseguridad en el Smart Grid, entre ellas está seguir ciertas prácticas cada vez más frecuentes en los servicios en Internet.

E. Vehicle-to-Grid (V2G)

El vehículo eléctrico tendrá un papel de mucha importancia en el ecosistema de Smart Grid. Se reconoce como una tecnología que será clave para mejorar la competitividad de la economía al menos por dos vías: el uso más eficiente de la energía y las infraestructuras, y su contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte (Ramos, 2010).

La tecnología V2G (Vehicle-to-Grid) utiliza la energía almacenada en baterías de vehículos eléctricos, tales como *Battery Electric Vehicle* (BEVs) y los *Plug-In Hybrid Electric Vehicle* (PHEV), para proporcionar electricidad a la red cuando los operadores así lo soliciten (horas pico, mayormente). La ventaja de V2G no es sólo la reducción en el costo equivalente en la movilidad, sino también el aumento en la eficiencia y la fiabilidad de la red existente, como efecto de la disminución del uso del petróleo y de la integración de una mayor proporción de energías renovables intermitentes (i.e eólica, solar) (Zpryme, 2010).

Por otro lado, las instituciones participantes en la elaboración de la Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo Eléctrico en España (Grupo Motor) indican que:

El vehículo eléctrico, como cualquier nueva tecnología, debe superar ciertas barreras para su introducción, tanto por el desconocimiento de los usuarios de las posibilidades reales y beneficios que le ofrece, como por la necesidad de que la oferta se desarrolle lo más ampliamente posible. Sin lugar a dudas, el vehículo eléctrico o enchufable, habrá de convivir durante muchos años con las actuales tecnologías basadas en el motor de combustión interna.... Así pues, desde el punto de vista de las prestaciones debemos considerar al vehículo eléctrico con realismo y mesura, ya que no siendo, de momento, una alternativa general al vehículo de combustión interna para cualquier movilidad, sí es adecuado para el ámbito urbano y periurbano. (Mityc et al., 2010, p.6)

Finalmente, cualquier nuevo desarrollo debe mirar hacia delante, prever requisitos futuros y aprovechar las nuevas tecnologías que surjan. Actualmente existe una campaña muy importante para fomentar la adquisición de vehículos eléctricos. Si su implantación masiva se hiciese realidad, como parece que será, la red deberá ser capaz de hacer frente a un enorme incremento de la demanda. Por ello está previsto que se aprovechen las baterías de los PHEVs como reserva energética para satisfacer picos de consumo muy elevados (Boal, 2010)

III. Modelo conceptual y la interoperabilidad

El Acta de Independencia Energética y Seguridad (EISA) de 2007 designa al National Institute of Standards and Technology (NIST) como eje para la coordinación y desarrollo de un marco y un modelo para Smart Grid. La hoja de ruta del NIST (2010a) constituye un plan de trabajo para la interoperabilidad de estándares para Smart Grid. Define un marco conceptual para examinar las necesidades en este ámbito, proporciona una lista de los estándares existentes, orienta la elaboración de las normas que guían las deliberaciones de la industria y establece un conjunto de medidas prioritarias para avanzar en los planes de estandarización del sector y mejorar la interoperabilidad de redes inteligentes.

El modelo conceptual de Smart Grid del NIST es un conjunto de diferentes puntos de vista (diagramas) y descripciones que son la base fundamental para la discusión de las características, usos, comportamientos, interfaces, requisitos y estándares del ámbito de Smart Grid. Cabe resaltar que el modelo no representa la arquitectura final sino que es marco conceptual, una herramienta para describir y discutir el desarrollo de dicha arquitectura.

El modelo conceptual de la Figura 2 (NIST, 2010a) permite identificar y debatir los problemas de interoperabilidad para avanzar en la integración. Resalta las áreas clave del problema de interoperabilidad y puede ayudar a resolver problemas de interdependencias en el sistema eléctrico y otras infraestructuras, y además refleja el papel cada vez más importante de la tecnología.

El modelo conceptual se compone de varios *dominios*, cada uno de los cuales contiene muchas aplicaciones y los *actores*, que están conectados por las *asociaciones*, las mismas que tienen *interfaces* en cada extremo.

En el modelo los dominios se conectan o interactúan a través de interfaces de carácter eléctrico o conexiones de comunicaciones. En la Figura 2, las interfaces eléctricas se muestran con líneas discontinuas amarillas y las interfaces de comunicación con líneas continuas azules. Cada una de estas interfaces puede ser bidireccional. Las interfaces de comunicación no representan necesariamente conexiones físicas sino conexiones lógicas de información entre distintos dominios.

En la parte inferior del modelo se identifican las cuatro áreas funcionales en las que tradicionalmente se ha subdividido la red eléctrica: generación, transporte,

Conceptual Model

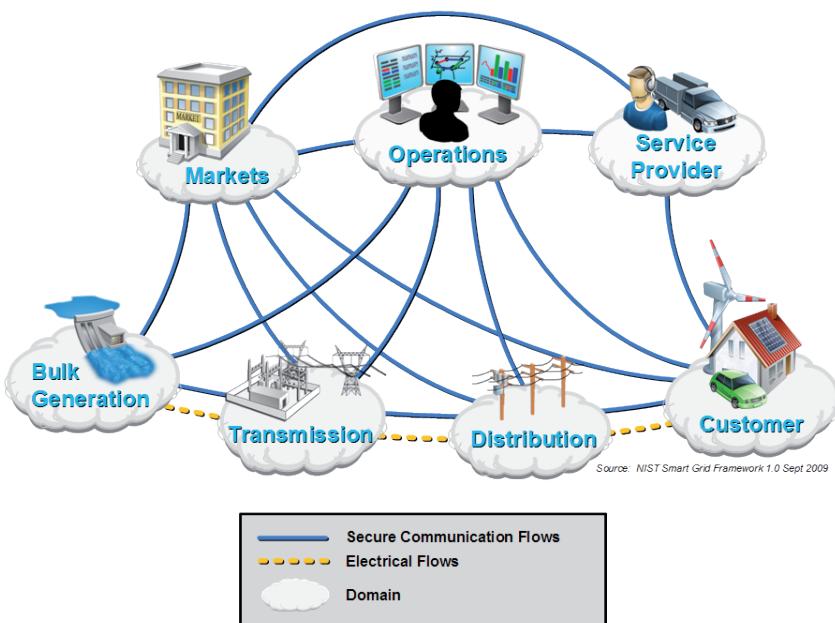


Figura 2. Interaction of actors in different Smart Grid Domains through Secure Communication Flows (NIST, 2010a, p.33)

distribución y consumo, entre las que la energía fluye en un solo sentido, desde el punto de generación hacia el usuario. Sin embargo, gracias a la implantación de los aspectos claves de Smart Grid discutidos en la sección II (paradigma bidireccional, interactividad, la ya importante proliferación de las energías renovables y la prevista de los vehículos eléctricos) el modelo de red se alterará irremediablemente.

El modelo conceptual descrito proporciona una perspectiva global de alto nivel. No es sólo una herramienta para la identificación de actores y posibles vías de comunicación en la red inteligente, sino también una forma útil para la identificación de las interacciones potenciales intradominio e interdominio, y las aplicaciones potenciales y capacidades habilitadas por estas interacciones. Por otro lado, el diagrama de referencia conceptual del NIST (Figura 3) tiene la intención de ayudar en el análisis; no es un esquema de diseño que define una solución y su implementación. En otras palabras, el modelo conceptual es solo descriptivo. Su propósito es fomentar la comprensión de las complejidades operativas de Smart Grid, pero no determinar la forma como la red inteligente se llevará a cabo.

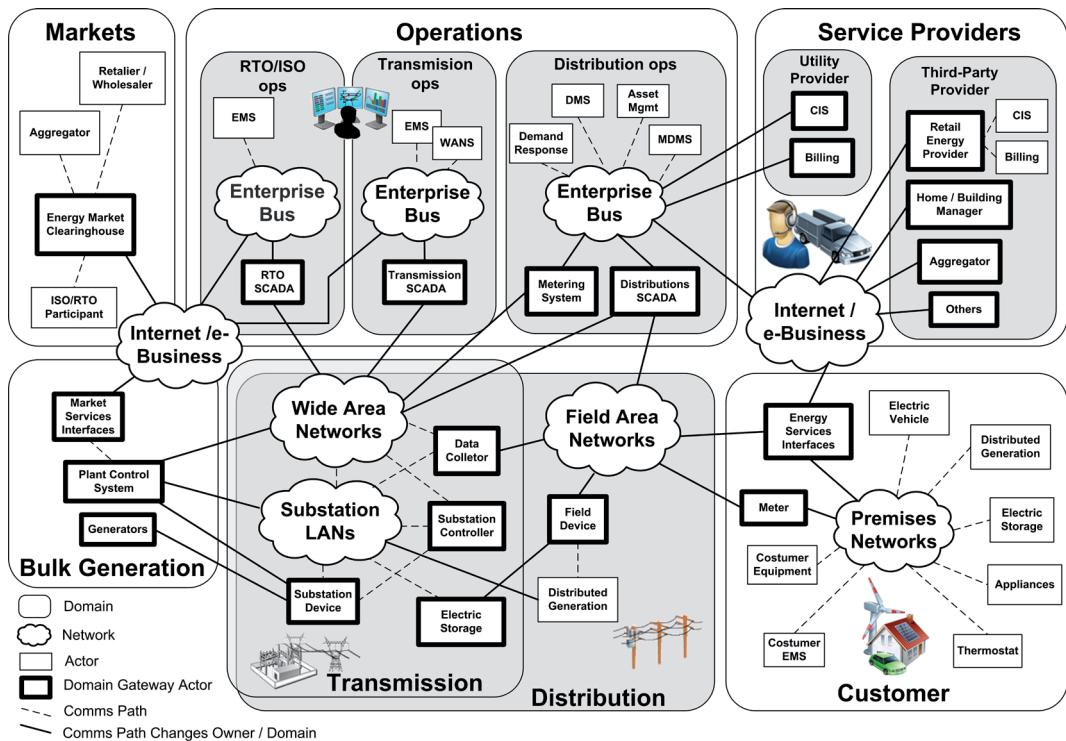


Figura 3. NIST Smart Framework 1.0. (NIST, 2010a)

El diagrama muestra una visión particular de cómo iniciar el abordaje del problema de integración de los siete dominios del modelo conceptual. En él, a través de algunos módulos Gateway y tecnologías de comunicación identificadas inicialmente se conectan una serie de redes o núcleos de información generados o solicitados por los actores o stakeholder del sistema.

IV. Diseño Arquitectura de Smart Grid

Aunque la generación y el transporte convencionales siguen existiendo en este nuevo modelo, las redes eléctricas se están transformando en millones de nodos interconectados. Una proporción de la electricidad generada en las vastas plantas convencionales será reemplazada por la generación distribuida, las fuentes renovables, la gestión activa de la demanda y los sistemas de almacenamiento. Y los usuarios pasarán de ser simples receptores pasivos de electricidad a convertirse, al mismo tiempo, en fuentes y sumideros de energía (Boal, 2010).

Es importante enfatizar el papel que están llamadas a desempeñar las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) para adaptar la red eléctrica. Como se

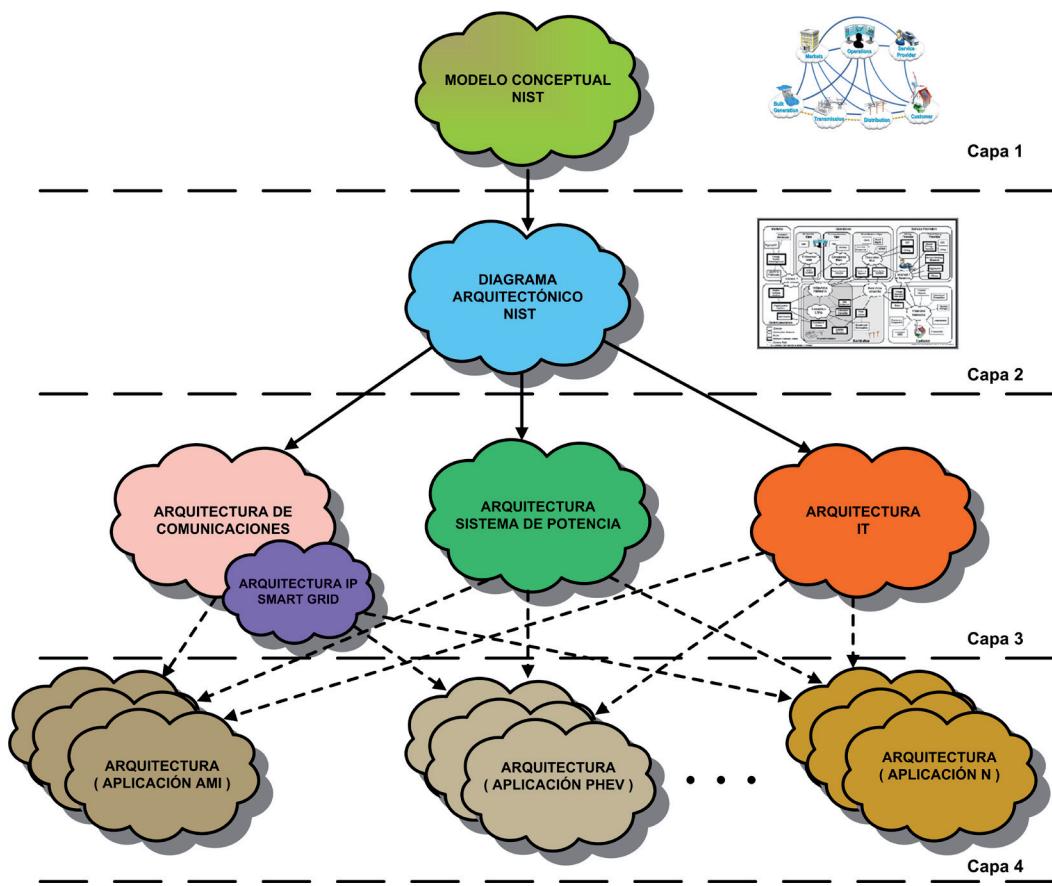


Figura 4. Modelo de cuatro niveles para la implantación de Smart Grid. Adaptado de: 4-Layers Architecture Smart Grid Model (Sonoma Innovation, 2009b, p 4)

mencionó, para 2020 deberá ser interactiva, siguiendo el modelo de Internet, tanto para la generación como para las cargas. La toma de decisiones dejará de estar centralizada y se establecerá un control distribuido a través de los nodos dispersos del sistema, que hará que la información circule de forma bidireccional (Boal, 2010).

De acuerdo con lo expuesto, la red inteligente puede ser vista como un gran sistema de sistemas, en que se puede expandir cada uno de los siete dominios definidos por el NIST (Figura 2) a tres áreas fundamentales: la capa del sistema de potencia y energía, la capa de comunicación y la capa de TI.

El desarrollo de estas dos últimas capas permite a la capa de potencia y energía convertirse en "más inteligente". Sonoma Innovation (2009a, 2009b) propone una metodología de diseño de cuatro niveles (ver Figura 4) en que en los dos primeros se encuentran precisamente el modelo conceptual y el marco arquitectónico del NIST

descrito en el apartado anterior. De los bloques del marco de interoperabilidad para Smart Grid (nivel 2) se desprende el nivel 3, en el que se identifican sus tres áreas fundamentales: el sistema de energía y potencia, la arquitectura de comunicaciones y la arquitectura de TI. Cabe resaltar que esta visión no es única ni definitiva.

El marco conceptual del NIST se sitúa en un nivel más alto y amplio y proporciona el contexto para los aspectos técnicos más detallados de la interoperabilidad, el diseño de modelos y el mapeo de requerimientos de una determinada familia de soluciones basadas en los estándares y criterios técnicos. Finalmente, una solución manifiesta un diseño en un proveedor de software de tecnología en particular, asegurar la evaluación de los diseños, modelos y marcos (GridWise Architecture Council [GridWise], 2008). Según Basso & DeBlasio (2009), el informe del NIST ha identificado en los planes de acción prioritarios al estándar IEEE P2030 –que se centra principalmente en la interoperabilidad de Smart Grid– y a la serie de estándares IEEE 1547 –encargados de la interconexión de los recursos distribuidos con la grilla eléctrica–. En Basso (2011) se describen los principios de diseño para la interconexión e interoperabilidad de dichos estándares de la IEEE.

Basso (2009) e IEEE (2011) –el borrador más reciente de la guía para la interoperabilidad de Smart Grid– proporcionan una base de conocimiento respecto a la terminología, las características, el desempeño funcional, los criterios de evaluación y la aplicación de los principios de ingeniería para la interoperabilidad Smart Grid. Incluye la integración al sistema de energía de las TIC, necesarias para lograr un funcionamiento confiable para la generación y distribución de energía y aplicaciones de usuario final, que permitirá en últimas el flujo bidireccional de energía e integración de fuentes de energía renovable con la respectiva comunicación y control.

V. Arquitectura de comunicaciones de Smart Grid

En esta sección se propone un marco para la arquitectura de comunicaciones de Smart Grid con sus segmentos clave y elementos constitutivos. Es un refinamiento del modelo de cuatro niveles (ver Figura 4). Su arquitectura se define en el nivel inferior. La Figura 5 muestra los componentes básicos de un sistema de comunicaciones de extremo a extremo e incluye la terminología utilizada para definir los múltiples segmentos de red y los puntos de demarcación (límites), que tienen un rol clave para una adecuada interoperabilidad, la definición de acuerdos de nivel de servicio (SLA) y el cumplimiento de métricas de rendimiento de las mismas interfaces. Esta segmentación y la demarcación ofrecen un enfoque modular y flexible que permite definir los segmentos de interoperabilidad, las interfaces y los elementos para la gestión y operación, con base en las mejores prácticas de la industria de telecomunicaciones y energía.

En el caso específico de la arquitectura de comunicaciones que muestra la Figura 5, Smart Grid es un sistema de sistemas que combina una gran variedad de tecnologías,

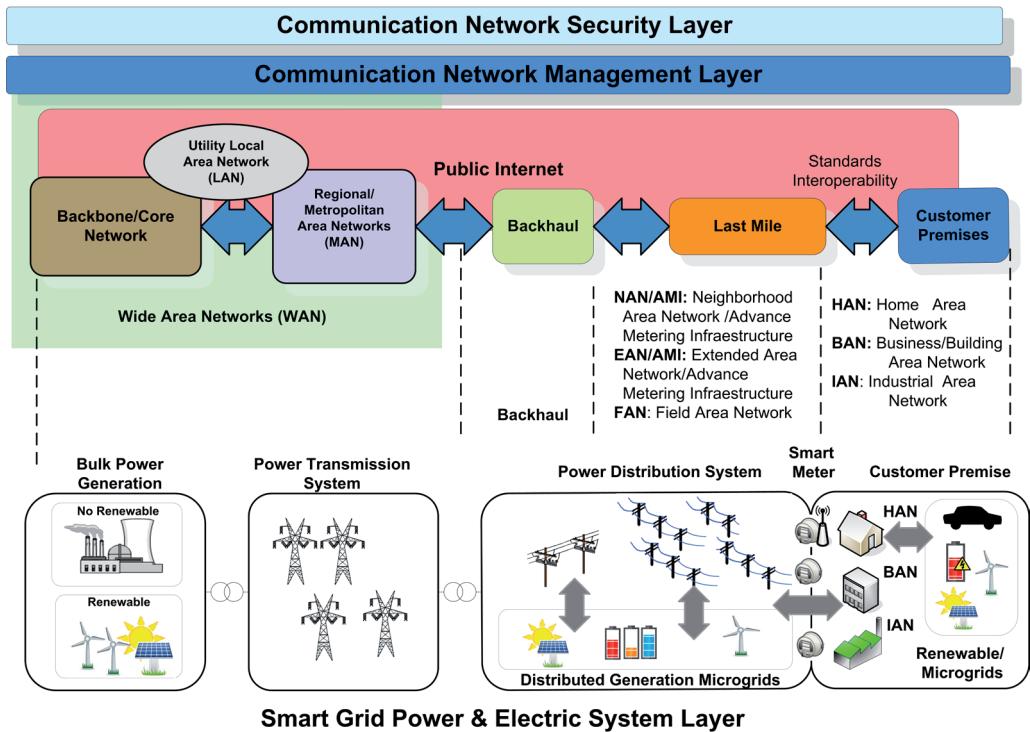


Figura 5. Infraestructura de comunicaciones para Smart Grid. Adaptado de End-to End Smart Grid Communications Architecture (Sonoma Innovation, 2009b, p.7)

en que dichos subsistemas requieren interfaces bien definidas y armonizadas con los estándares existentes. Se propone una arquitectura que utiliza IP como protocolo unificador de múltiples protocolos, intradominios e interdominios. En la misma figura se presenta una segmentación en diferentes tipos de redes, a su vez contrastada con los dominios del sistema de potencia (generación, transmisión y distribución).

Los elementos básicos de esta arquitectura de comunicaciones son:

- **Customer Premise.** Una vivienda individual, un edificio y una empresa, requiere respectivamente una HAN (*Home Area Network*), una BAN (*Building Area Network*) o una IAN (*Industrial Area Network*). Bajo el título de HAN se agrupan las tres. Una HAN es una red de comunicaciones de corto alcance que conecta electrodomésticos y otros dispositivos en el entorno de una vivienda o edificio. Al combinar las HAN con la infraestructura AMI los consumidores podrán monitorizar su uso de energía a través de pantallas instaladas en sus hogares o programar sus termostatos o sistema de aire acondicionado en función del precio de la energía, y a las compañías se les garantizará el acceso directo a las cargas, lo que les permitirá gestionar de forma

más eficiente su demanda. Estas redes también están conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como los PEV (*Plug-In Electric Vehicle*), fuentes de energía renovable (solar / eólica) y dispositivos de almacenamiento.

- **Última milla (*last mile*).** Son redes de comunicaciones de dos vías tanto inalámbricas como cableadas superpuestas al sistema de distribución de energía. Torchia (2011) señala que una parte integral del éxito de Smart Grid estará determinado por la capacidad de la red de distribución para soportar cambios en los procesos de negocio que resultan de metas como la eficiencia energética, la respuesta de la demanda, de las exigencias regulatorias, así como de la posibilidad de integración de recursos distribuidos. El autor entrega una lista de diez consideraciones para seleccionar una red de área de distribución para Smart Grid.

En el segmento de última milla se pueden definir las redes NAN y FAN o la infraestructura AMI, según las características del sistema de red del proveedor de servicios, el tipo de servicios ofrecidos, la topología de red, la demografía y la tecnología utilizada por el proveedor. Una NAN proporciona cobertura en un área geográfica limitada, que habitualmente se extiende por varios edificios.

- **Backhaul.** Es el sistema que conecta la red WAN a la red de última milla. Agrega y transporta datos de la red de telemetría de los usuarios finales, parámetros críticos de control de las subestaciones e información de campo de los dispositivos de la red de distribución.

- **Wide Area Networks (WAN).** Cubren áreas más amplias y por lo general integran varias redes de menor tamaño, que usan diferentes sistemas de comunicación (Lima, 2011; Trilliant, 2009). Se componen de la red de núcleo o red troncal y de la red de área metropolitana (MAN), que en conjunto conectan la mayoría de los servicios de las redes troncales de los distintos proveedores de servicio a lo largo de las líneas de transmisión eléctrica de alta potencia –o usando radioenlaces–. La elección de una u otra tecnología depende de factores como la confiabilidad, el costo, la seguridad y la infraestructura disponible.

La Figura 6 proporciona una descripción de alto nivel del ecosistema de Smart Grid. Su objetivo es garantizar una adecuada interoperabilidad entre todos los dominios, específicamente entre los sistemas de información y las tecnologías de comunicaciones, de manera que todos los *stakeholders* (proveedores de servicios públicos, clientes, entes reguladores, etc.) puedan interactuar con el sistema y participar en el cumplimiento de las metas sociales y de negocio propuestas alrededor de la grilla inteligente. Para garantizar dicha participación se parte de una red HAN en la que los consumidores podrán instalar monitores y controles, y en la que, a través de la red del proveedor de servicios de energía, formada por infraestructura de comunicaciones y de potencia, se accede a las aplicaciones de los proveedores de servicios. Cada uno de los dominios

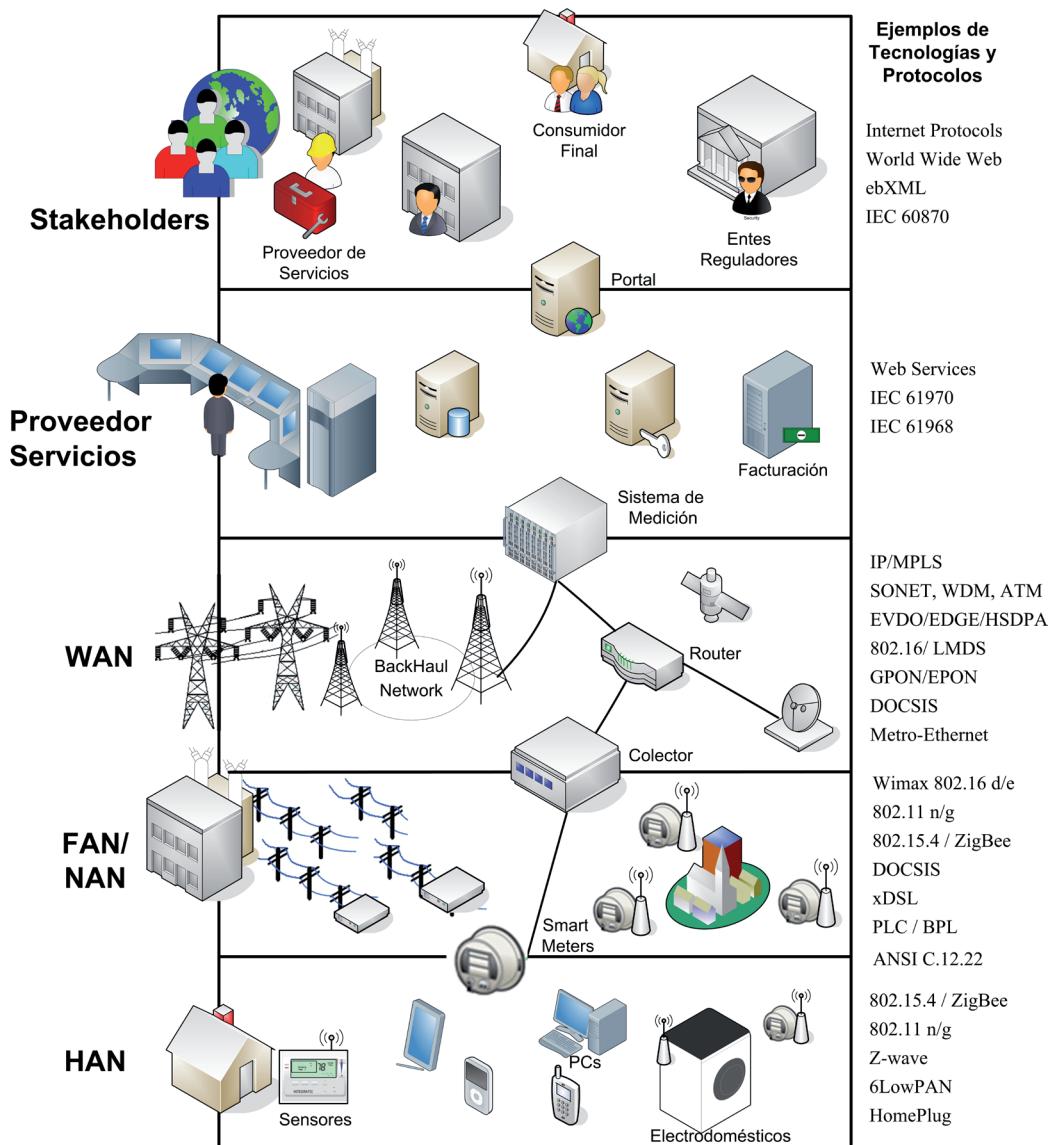


Figura 6. Mapeo de estándares y tecnologías a varios segmentos de Smart Grid.

Adaptada de: Smart Grid High Level Overview (Gunther et al., 2009, p.10)

representa una zona de interoperabilidad donde puede haber estándares o tecnologías que compitan entre sí o sean complementarias.

Para Chandy, Gooding y McDonald (2010), y Gunther, Snyder, Gilchrist y Highfill (2009) (ver Figura 6), la arquitectura actual de la red eléctrica puede ser vista como un sistema de sistemas caracterizada por un conjunto de silos. Es decir, las

diferentes funciones de la red, tales como la facturación, la distribución y la medición de energía, utilizan diferentes silos de información integrados por una fina capa de TI. Chandy et al. (2010) asegura, además, que para que las soluciones Smart Grid se integren exitosamente se debe realizar una transición de la arquitectura actual (silos) a otra basada en estándares ampliamente adoptados, en servicios comunes y sistemas débilmente acoplados. En los cuatro patrones arquitectónicos propuestos en dicho trabajo se analizan las ventajas y los riesgos de cada uno de ellos, y resalta que cada transición de un modelo arquitectónico a otro tiene costos elevados, lleva tiempo y requiere decisiones estratégicas de diseño, tanto en la red eléctrica como de la arquitectura de TI y comunicaciones.

La Figura 6 muestra los diferentes estándares y las tecnologías provistas para cada tipo de red de comunicación identificada en el entorno de Smart Grid. Los *stakeholder*—y más propiamente las compañías del sector energético— probablemente optarán por instalar varios de esos tipos, para de esta manera tener la capacidad de enfrentar diferentes dificultades geográficas, distintas densidades de población y diferentes requerimientos de ancho de banda y tiempos de respuesta, por ejemplo. Craemer & Deconinck (2010) proponen una arquitectura de comunicaciones para Smart Grid y analizan cada estándar disponible junto con los criterios para su selección y ubicación en el modelo OSI.

Díaz (2011) y Katz (2010b) muestran cómo las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) son necesarias para desarrollo del negocio energético. Uno de los requisitos fundamentales para la implementación de una red inteligente es poseer y gestionar en tiempo real un gran volumen de información del estado de la generación y del estado de la red de transporte/distribución, así como de los usuarios finales. Esto tiene implícita la necesidad de disponer de una infraestructura de TIC escalable, confiable y segura. Se discute sobre la integración y la consolidación de aspectos tales como la generación y el almacenamiento distribuidos; el *smart metering* y la información de consumo en tiempo real (AMI); los modelos de negocio *Time of Use* (TOU) y *Dynamic Pricing*; la instalación de *Energy Management Systems* (EMS) tanto en hogares como en locales comerciales e industriales; la integración de vehículos eléctricos (V2G); la sensorización y controles autónomos y la ciberseguridad. Ngan (2008) plantea la inteligencia de negocio (*business intelligence*) como una pieza clave para el análisis de datos del sistema distribuido e interpretación de la red eléctrica al extraer información útil que constituye un puente entre las TI y las operaciones. Nombra, además, como atributos clave de Smart Grid la tolerancia a fallos, lo que se conoce como *self-healing*, seguridad ante amenazas físicas y cibernéticas, la capacidad de soportar un amplio rango de fuentes de generación distribuida y facilitar al usuario final un mejor control del consumo de energía, y la capacidad de la red HAN de interactuar con el sistema de gestión de energía de las empresas de servicio. Todo alrededor de las funciones y los dominios de la Smart Grid.

VI. Iniciativas de desarrollo de Smart Grid

En la actualidad hay muchas actividades en paralelo relacionadas con la estandarización de redes Smart Grid. Dado que estas actividades son relevantes para el mismo tema, es inevitable cierto traslape y duplicación de ellas. Existen varios organismos de desarrollo y estandarización, entre ellos:

IEC Smart Grid Strategy Group. La International Electrotechnical Commission (IEC) es el punto focal natural para la industria eléctrica. Tiene como objetivo proporcionar una fuente de referencia única para la gran cantidad de proyectos de Smart Grid que se están poniendo en marcha en todo el mundo. Ha desarrollado un marco para la estandarización que incluye protocolos y estándares de referencia para lograr la interoperabilidad de los sistemas y dispositivos Smart Grid (Boswarthick et al., 2010).

National Institute of Standards and Technology (NIST). No es un cuerpo de estandarización en sí mismo, sino que ha recibido la designación del gobierno de los Estados Unidos para gestionar el proyecto de selección de un conjunto de estándares para la red Smart Grid de ese país (NIST, 2010b).

EU Commission Task Force for Smart Grids. Su misión es asistir a la Comisión Europea en las políticas y directrices de la reglamentación europea y coordinar los primeros pasos hacia la implementación de Smart Grid en la prestación del tercer paquete energético (EC TF for Smart Grids, 2010).

IEEE P2030. Es un grupo de trabajo de la IEEE para el desarrollo de una guía para la interoperabilidad de Smart Grid en la operación de las tecnologías energéticas y tecnología de la información con el sistema de energía eléctrica (EPS) y las cargas y aplicaciones de usuario final (Boswarthick et al., 2010).

Muchos proyectos de demostración están actualmente en marcha y algunos resultados están disponibles (EC TF for Smart Grid, 2010). Las iniciativas más representativas en el campo de Smart Grid están presentes en Estados Unidos, Europa, Japón y China.

A. Iniciativas en EE.UU.

El concepto Smart Grid o grilla inteligente, aunque no se encuentra definido completamente, ha comenzado a ganar notoriedad a partir del Acta de Independencia de Energía y la Ley de Seguridad de EE.UU (NIST, 2010a).

EISA ha asignado responsabilidades. El NIST ha diseñado un plan de tres fases para identificar rápidamente un conjunto inicial de estándares –en tanto se logra un proceso más robusto de desarrollo continuo e implementación de estándares–, las necesidades y oportunidades resultantes y los avances tecnológicos (NIST, 2010a).

El despliegue de diversos elementos de la red inteligente, incluidos los sensores inteligentes en las líneas de distribución, los medidores inteligentes en los hogares y las

dispersas fuentes de energía renovable, ya está en marcha y se acelera como resultado de ayudas de inversión y otros incentivos del Departamento de Energía (DOE), tales como garantías en préstamos para proyectos de generación de energía renovable.

Aunque la tecnología Smart Grid aún está en desarrollo, puede necesitar cientos de requerimientos, estándares y especificaciones. Algunos con más urgencia que otros. Por ello el NIST se ha concentrado inicialmente en los requerimientos identificados en la Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC), que destaca ocho áreas: respuesta a la demanda y eficiencia del consumo de energía, conciencia situacional de área amplia, almacenamiento de energía, transporte eléctrico, Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), gestión de la grilla de distribución, ciberseguridad y redes de comunicaciones (NIST, 2010a; 2010b).

Sobre la base de los datos obtenidos por los entes interesados y los lineamientos técnicos dados por NIST esta primera versión del marco sobre Smart Grid y la rutas de trabajo ha identificado 75 estándares, especificaciones o guías que pueden ser inmediatamente aplicables o muy probables de aplicar en la actual transformación de Smart Grid (NIST, 2010a).

B. Iniciativas en la Unión Europea

En Europa también se ha comenzado a trabajar sobre Smart Grid y se ha encargado el mandato M/441 a tres organizaciones de estandarizaciones europeas: el Comité Europeo de Normalización (CEN), el Comité europeo de normalización electrotécnica (CENELEC) y el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) para la definición de una arquitectura abierta para los contadores de servicios públicos y servicios. Este mandato cubre las funciones y comunicaciones del medidor inteligente para el uso de las aplicaciones de electricidad, gas, calefacción y agua. Actualmente hay alrededor de 110 estándares técnicos aplicables disponibles para el campo de los medidores inteligentes. Sin embargo, no hay detalles de una arquitectura abierta que cubra el amplio rango de aplicaciones. Este mandato debe asegurar la interoperabilidad de tecnologías y aplicaciones en el mercado europeo. La visión de una arquitectura abierta posiciona el *gateway* del medidor inteligente como un dispositivo central en el hogar.

C. Iniciativas en Japón

Japón tiene como objetivo reducir de las emisiones de CO₂ en un 25% en comparación con los niveles alcanzados en 1990. La administración japonesa financiará la red de distribución de próxima generación pero con un enfoque más específico: permitir la introducción de energías renovables y crear una nueva infraestructura para los vehículos eléctricos y los nuevos servicios, a través de la utilización de contadores inteligentes y de la red TIC, ya que la actual red eléctrica existente en Japón se considera confiable.

The Corporate Governance Study Group Report (METI, 2009), incluye un proyecto de Smart Grid en una isla remota (proyecto de Microred); un proyecto de carga inteligente (con un enfoque en los EV); y un proyecto *Smart House* (un elemento del sistema comunitario de Red) (EC TF for Smart Grid, 2010).

D. Iniciativas en China

El mercado de China es un mercado muy importante para Smart Grid. Los requerimientos que hay son para una red más fuerte y más inteligente, con grandes inversiones centradas en el aumento de la capacidad, la confiabilidad, la eficiencia y la integración de las energías renovables.

El gobierno chino aprobó un plan de estímulos de \$586 billones de dólares para inversión a gran escala en materia de vivienda de bajos ingresos, agua, infraestructura rural y electricidad. Un efecto secundario de este plan de estímulos es el aumento de la inversión en energía renovable y la eficiencia energética en China. Un acercamiento muy prometedor para el país, como la inclusión de planes de conservación de energía en su infraestructura, es la construcción de una red inteligente (EC TF for Smart Grid, 2010).

VII. Retos Típicos en Smart Grid

Con la gran cantidad de beneficios que Smart Grid puede ofrecer y las mejoras en las capacidades de la tecnología –junto con la reducción de los costos de ella–, la inversión en tecnologías de redes inteligentes debe ser un foco vital para los actores y dominios de Smart Grid. Los proveedores del servicio eléctrico, sin embargo, han tardado en responder debido algunos factores como la obsolescencia de la tecnología, que juega un papel crítico en la preocupación de las empresas de servicios del sector eléctrico a la hora de invertir en Smart Grid. El temor de que las nuevas tecnologías se vuelvan obsoletas en un corto período conlleva un enfoque de esperar y ver. Esta es particularmente la situación con las tecnologías de comunicación que forman la columna vertebral desde el medidor final hasta la subestación. Hace una década los debates se centraban en los AMR móviles frente a los fijos. Ahora la cuestión es más complicada, con opciones que abarcan líneas de alta tensión y de banda ancha y con tecnologías inalámbricas como WiMAX, 3G y 4G, que son aplicaciones de rápida maduración, sin contar la interoperabilidad con las denominadas redes HAN en el lado del usuario final (McDonald, 2008; Bullis, 2009; & Redorbit, 2009).

Mientras las tecnologías de comunicación son sin duda evolucionadas, las empresas de servicios deberían abogar por los estándares abiertos, como los basados en IP, que se están convirtiendo rápidamente en la expectativa de las nuevas tecnologías. Esto significa que la gran variedad de equipos inteligentes requeridos (i.e medidores, sensores, AMR) están diseñados para ser independientes

de los entornos alternativos de comunicación. Además, las soluciones híbridas que combinan las tecnologías para adaptarse a características específicas del terreno de una empresa de servicios públicos son cada vez más comunes y ayudan a mitigar el riesgo de las inversiones en una única tecnología. Humayun Tai, un socio de McKinsey que trabaja con empresas de servicios públicos en el desarrollo de sus estrategias de Smart Grid, comentó que

Las empresas de servicios necesitan trabajar hacia atrás desde la comprensión de que es exactamente lo que requiere la grilla y cuáles funcionalidades de medición necesitan, y cómo esto se traduce en ancho de banda, latencia y otros requisitos, y luego determinar cuáles son las soluciones de comunicación más óptimas (McDonald, 2008, p.23).

A pesar de este primer estado de desarrollo de TI, las empresas de servicios deben reconocer que los despliegues de Smart Grid no suceden de la noche a la mañana. Las implementaciones toman lugar normalmente durante varios años para dar tiempo suficiente para probar y desarrollar sus planes de integración. La agregación de estos desafíos lleva a un ambiente donde las empresas de servicios son excesivamente prudentes. Prevalece un período prolongado de múltiples tecnologías piloto. Mientras que los pilotos son un paso importante para confirmar tanto la idoneidad como los beneficios de las tecnologías Smart Grid, a menudo se diseñan para poner a prueba un amplio conjunto de capacidades (McDonald, 2008).

Las TIC, en el desarrollo de Smart Grid, enfrentan desafíos de procedimiento y desafíos técnicos.

A. Desafíos de procedimiento

- Amplio conjunto de *stakeholders*. Smart Grid afectará a cada persona y cada negocio en los Estados Unidos. Sin embargo, no todas las personas que participan directamente en el desarrollo de la Smart Grid necesitan comprender y atender las necesidades de todos estos actores (Bullis, 2009; Cupp & Beehler, 2008; & EPRI, 2009).
- Complejidad. Smart Grid es un sistema muy complejo, y algunas de sus partes corren a la velocidad de la luz. Algunos de sus aspectos serán sensibles a la respuesta e interacción humana, mientras que otros necesitarán respuestas instantáneas y automatizadas. La red inteligente se verá impulsada por fuerzas que van desde las presiones financieras hasta las exigencias medioambientales (EPRI, 2009).
- Seguridad de los sistemas ciberneticos. Cada aspecto de la Smart Grid debe ser seguro. Las tecnologías de seguridad informática no son suficientes para lograr operaciones seguras sino se aplican políticas, evaluación de riesgos y entrenamiento. El desarrollo de estos procedimientos, centrados en la interacción

con personas, toma tiempo, lo que debe ser tenido en cuenta para asegurar que se lleven a cabo correctamente (EPRI, 2009; & Hawkins, 2010)

- Desarrollo y soporte de estándares. El proceso abierto de desarrollo de estándares se beneficia a partir de la experiencia y los conocimientos de un amplio grupo. El trabajo es difícil y lleva tiempo, pero produce resultados más impactantes para un amplio grupo de *stakeholders*, en lugar de los intereses de un grupo particular. El compromiso permanente por grupos de usuarios y otras organizaciones permite a los estándares satisfacer necesidades más amplias de evolución, más allá de los intereses de la industria. Ambas actividades son esenciales para el desarrollo de estándares robustos (EPRI, 2009).
- Investigación y Desarrollo (I+D). La red inteligente es un objetivo en evolución. No se puede saber todo lo que la red inteligente está en capacidad de hacer. La red inteligente demanda continuamente I+D para evaluar la evolución de los beneficios y los costos, y poder anticipar el cambio en los requisitos con el paso del tiempo.
- Cooperación. La posible existencia de partes de dispositivos inteligentes intercambiables de diversos proveedores mundiales hace necesaria una mínima colaboración entre las industrias, lo que resulta en procesos para cada empresa desarrolladora (EPRI, 2009).

B. Retos técnicos

- Sistemas de comunicación. Los medios de comunicación y el desarrollo de protocolos de comunicación están en diferentes etapas de madurez. La red inteligente debe ser lo suficientemente robusta para dar cabida a los nuevos medios que emergen de las industrias de comunicaciones, y al mismo tiempo mantener sistemas interoperables y seguros (Cupp & Beehler, 2008; EPRI, 2009; & Fehrenbacher, 2010).
- Gestión de datos. Asociados a todos los aspectos de recolección, análisis y almacenamiento de datos, que surgen por información y aplicaciones de usuarios, incluidas cuestiones de identificación, validación, actualización en el tiempo, etc. Los métodos de gestión de esa gran cantidad de datos son un factor a tener en cuenta, tanto porque se han convertido en la tarea más difícil y la que más consume tiempo en la mayoría de las funciones como porque deben ser abordadas de tal manera que sean escalables. (Bullis, 2009; Cupp & Beehler, 2008)
- Seguridad cibernética. La seguridad cibernética, como se mencionó, se refiere a la prevención de daños, al uso no autorizado, a la explotación y a la restauración de información electrónica en los sistemas de comunicaciones y los servicios, incluida la información contenida en ellos, para garantizar su confidencialidad, integridad y disponibilidad (EPRI, 2009; & Hawkins, 2010).

- Información y confidencialidad de los datos. La protección y la gestión de la privacidad es una preocupación importante en un sistema ampliamente interconectado de sistemas que son representados por Smart Grid. Además, se debe asegurar la presencia de varios niveles de acceso, ya que diferentes *stakeholders* tienen diferentes privilegios de acceso a la información de la red inteligente (EPRI, 2009; & Hawkins, 2010).
- Aplicaciones de software. Las aplicaciones van desde algoritmos de control de bajo nivel para el procesamiento de transacciones masivas. Los requerimientos de las solicitudes son cada vez más sofisticados, se dirigen a resolver problemas cada vez más complejos, demandan datos cada vez más precisos y oportunos, y deben dar resultados muy rápidos y con la mayor precisión. Las aplicaciones de software son el núcleo tanto de cada función como de Smart Grid (Bullis, 2009; Cupp & Beehler, 2008; EPRI, 2009; & Fehrenbacher, 2010).
- Problema de almacenamiento de energía. La falta de buenas opciones de almacenamiento ha afectado a los operadores de servicios por generaciones. Obligados a proporcionar un suministro constante de electricidad para satisfacer la constante demanda, han recurrido al costoso e ineficaz método de ajuste por plantas o centrales que usan combustibles fósiles que se activan durante los períodos de alta demanda.

Hawkins (2010), González, J., Restrepo, H., Isaac, I. & López, G. (2011) y Lindley (2011) describen algunas tecnologías para el almacenamiento de energía que se desarrollan en la actualidad e incluyen algunas presentes desde hace varias décadas. El reto es hacerlas robustas, confiables y económicamente competitivas, mientras se ajusta la tecnología de cada fuente o localización. Cada tecnología tiene características únicas. Nunca habrá una tecnología ganadora. Escoger la tecnología adecuada implica mirar cada una en detalle.

De la implementación de una red inteligente se esperan beneficios económicos y ambientales, pero todavía queda mucho trabajo por hacer y muchos retos por superar para asegurar la transición del concepto a la realidad, poder integrar un abanico de diferentes tecnologías y satisfacer en lo posible a un grupo de *stakeholder* bastante heterogéneo.

Como se ha discutido en este artículo, hay muchos ámbitos de trabajo, pero especialmente para las TIC, necesariamente involucradas en esta transición. Hay numerosos factores a considerar y pasos que se pueden tomar ahora para prepararse. Lo interesante es que hay mucho por hacer y ningún país lleva hasta el momento una delantera muy marcada en el desarrollo definitivo de Smart Grid, lo que le da a los países en vía de desarrollo, como Colombia, la oportunidad de participar activamente en su diseño y desarrollo. **S&T**

Referencias bibliográficas

- Basso, T. & DeBlasio, R. (2009). *Advancing smart grid interoperability and implementing NIST's interoperability roadmap: IEEE P2030TM Initiative and IEEE 1547TM Interconnection standards*. Recuperado de: http://www.gridwiseac.org/pdfs/forum_papers09/basso.pdf
- Basso, T. (2009, Julio). *IEEE SCC21 P2030TM Standard development Smart Grid interoperability*. Paper presentado en MADRI Meetings, Philadelphia, PA. Recuperado de: <http://sites.energetics.com/madri/pdfs/P2030-MADRI-20090701-Basso.pdf>
- Basso, T. (2011, Abril). *IEEE SCC21 1547TM Interconnection and P2030TM Smart Grid interoperability series of standards* (slides). Presentación en ANSI Workshop: Standards and codes for electric drive vehicles, Bethesda, MD. Recuperado de: <http://publicaa.ansi.org/sites/apd1/Documents/Meetings%20and%20Events/EDV%20Workshop/Presentations/Basso-ANSI-EDV-0411.pdf>
- Boal, J. (2010). *Smart Grid*. Recuperado de: <http://www.dea.icai.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Smart%20grid%20-%20Jaime%20Boal.pdf>
- Boswarthick, D., Elloumi, O, & Ballot, JM (2010, abril). *Smart Grids. From the machine to machine perspective*. Presentación realizada en Future Internet assembly, Valencia, España.
- Recuperada de: http://www.future-internet.eu/fileadmin/documents/valencia_documents/sessions/smart_energy/5._boswarthick.pdf
- Bullis, K. (2009, Julio). *The big Smart Grid challenges*. Recuperado de: http://www.technologyreview.com/prINTER_FRIENDLY_ARTICLE.aspx?id=23015
- Chandy, K.M., Gooding, J., & McDonald, J. (2010, Diciembre). *Smart Grid system of systems architectures, systems evolution to guide strategic investments in modernizing the electric grid*. Paper presentado en Grid-Interop 2010, Working together for interoperability, Chicago, IL. Recuperado de: http://www.gridwiseac.org/pdfs/forum_papers10/gooding_gi10.pdf
- Coll-Mayor, D. (2009, Diciembre). *Overview of strategies and goals of Smart Grid in Europe*. Documento presentado en: R&D Collaboration for DG-ready grid architecture, pre-conference workshop, 4th international conference on integration of renewable and distributed energy resources of energy, Albuquerque, FL. Recuperado de: <http://www.4thintegrationconference.com/downloads/Strategies%20&%20Goals%20of%20Smartgrid%20in%20Europe.pdf>
- Cupp, J., & Beeler, M. (2008). Implementing Smart Grid communications: Managing mountains of data opens up new challenges for electric utilities. *Burns & McDonnell TECHBriefs*

- (2008) 4. 5-8. Recuperado de: <http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/article-smartgrid-part2-084.pdf>
- De Craemer, K. & Deconinck, G. (2010, Marzo). *Analysis of state of the art smart metering communication standards*. Presentación en Smart Grids and renewable energy production Session 1, Young researchers symposium 2010, Leuven, Bélgica. Recuperado de: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265822/1/SmartMeteringCommStandards.pdf>
- Department of Energy [DOE] (2008). *How the Smart Grid promotes a greener future*. Recuperado de: http://www.smartgrid.gov/sites/default/files/pdfs/sg_environmental.pdf
- Díaz, E. (2011) La Smart Grid y su dimensión TIC (Presentación). Recuperado de: <http://www.enerclub.es/files/frontAction.do?action=getFile&fileID=1000073806>
- Electric Power Research Institute [EPRI]. (2009, Junio). *Report to NIST on the Smart Grid interoperability standards roadmap* (Contract No. SB1341-09-CN-0031—Deliverable 7). Recuperado de: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/Interim_SmartGridRoadmapNISTRestructure.pdf
- Electricity Advisory Committee [EAC] (2008). *Smart Grid: enabler of the new energy*. Recuperado de: <http://energy.gov/oe/downloads/smart-grid-enabler-new-energy-economy>
- European Commission (2006). *SmartGrids technology platform. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the Future*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf
- European Commission Task Force for Smart Grids. (2010). *Mission for the task force for the implementation of Smart Grids into the European internal market*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/smartgrids/doc/mission.pdf
- Fehrenbacher, K. (2010, Febrero). *Smart Grid problem?: Smart at the edge, dumb in the middle*. Recuperado de: <http://gigaom.com/cleantech/smart-grid-problem-smart-at-the-edge-dumb-in-the-middle/>
- Flynn, B. (2007, Octubre). *What is the real potential of the Smart Grid?* Paper preparado para Autovation 2007 The AMRA international symposium, Sept-Oct, 2007, Reno, NV. Recuperado de: http://site.ge-energy.com/prod_serv/plants_td/en/downloads/real_potential_grid.pdf
- Galvin, R. & Yeager, K. (2008). *Perfect power: How the microgrid revolution will unleash cleaner, greener, and more abundant energy*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Gómez, L. (2011, Abril). *¿Qué eso de Smart Grid? La red eléctrica inteligente* (blog). Recuperado de: <http://lynnettegomez.wordpress.com/2011/04/25/%C2%BFque-eso-de-smart-grid-la-red-electrica-inteligente/>
- González, J., Restrepo, H., Isaac, I. & López, G. (2011). Esquema de incorporación de las Smart Grids en el sistema de potencia colombiano. *Revista Investigaciones*

- Aplicadas.* 9. 21-26. Recuperado de: <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/viewFile/798/732>
- Gunther, E.W., Snyder A., Gilchrist G., & Highfill, D. (2009). *Smart Grid standards assessment and recommendations for adoption and development* (Draft 0.83, preparado para la California Energy Commission). Knoxville, TN: EnerNex. <http://opensmartgrid.org/Shared%20Documents/Smart%20Grid%20Standards%20Landscape%20White%20Paper%20v0%2083.doc>
- Hart, D.G. (2008, Julio). Using AMI to realize the Smart Grid. En *Power and energy society general meeting - Conversion and delivery of electrical energy in the 21st Century*, IEEE 2008, Pittsburg, PA. 1-2. doi: 10.1109/PES.2008.4596961
- Hawkins, K. (2010, Agosto). *Smart Grid problems revealed: The NERC study*. Recuperado de: <http://www.masterresource.org/2010/08/smart-grid-nerc/>
- Hiskens, I.A. (2010, Julio). What's smart about the Smart Grid? *Design automation conference (DAC), 2010 47th ACM/IEEE*. Anaheim, CA. 937–939. New York, NY: ACM.
- Hussein, A., Harb, A., Kutkut, S., Shen, N., & Batarseh, J. (2010, Junio). *Design considerations for distributed micro-storage systems in residential applications*. Paper presentado en Telecommunications energy conference (Intelec), IEEE International 32nd. Orlando, FL
- IEEE. (2011). *IEEE Draft guide for Smart Grid interoperability of energy technology and information technology operation with the electric power system (EPS), and end-use applications and loads* (IEEE P2030/D6.0).
- Ipakchi, A., & Albuyeh, F. (2009). Grid of the future. *IEEE Power and energy magazine*, (7)2, 52-62. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4787536>
- Kaplan, M. (2009). *Smart Grid: Modernizing electric power transmission and distribution; Energy independence, Storage and security; Energy independence and security act of 2007 (EISA); Improving electrical grid efficiency, communication, reliability, and resiliency; integrating new and renewable energy sources*. Alexandria, VA: The Capitol Net.
- Katz, J. (2010a). *Successful Smart Grid architecture*. Recuperado de: <http://mthink.com/utilities/utilities/successful-smart-grid-architecture>
- Katz, J. (2010b). *Smart Grid security and architectural thinking*. Recuperado de: http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/us_en_us__energy__smartgridsecurity_and_architecturalthinking_katz.pdf
- Kwasinski, A. (2010, Junio). *Implication of Smart-Grids development for communication systems in normal operation and during disasters*. Paper presentado en Telecommunications energy conference (Intelec), IEEE International 32nd. Orlando, FL
- Lima, C. (2011, Abril). *Smart Grids IEEE P2030. IEEE P2030 Smart Grid communications architecture SG1*. Presentación en ETSI Workshop

- Standards: An architecture for the Smart Grid. Francia, Abril 5th 2011. Recuperado de: http://docbox.etsi.org/Workshop/2011/201104_SMARTGRIDS/02_STANDARDS/IEEE_LIMA.pdf
- Lindley, D. (2011). *Redes inteligentes: El problema del almacenamiento de la energía*. Recuperado de: <http://www.ngpiberoamerica.com/union-fenosa/redes-inteligentes-el-problema-del-almacenamiento-de-la-en.html>
- Mahmood, A. Aamir, M. & Anis, M.I. (2008, Octubre). Design and implementation of AMR Smart Grid system. *Electric power conference, 2008. EPEC 2008. IEEE*. Canadá. Vancouver, BC. 1– 6. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4749248%2F4763280%2F04763340.pdf%3Farnumber%3D4763340&authDecision=-203>
- McDonald, J. (2008). Leader o follower. The business scene. *IEEE Power & energy magazine*, 18-90. doi: 10.1109/MPE.2008.929699
- McNaughton, G. & Saint, R. (Enero, 2010). Enterprise integration implications for Home-Area Network technologies. *Innovative Smart Grid technologies (ISGT) 2010*, Gaithersburg, MD. 1-5. doi:10.1109/ISGT.2010.5434755
- Metke, A. & Ekl, R. Security technology for Smart Grid networks. (2010, Junio). *IEEE Transactions on Smart Grid*, (1)1, 99-107. Recuperado de: http://www.ece.mtu.edu/~zhuofeng/EE5970Spring2011_files/Security%20Technology%20for%20Smart%20Grid%20Networks.pdf
- Mytic et al., (2010). *Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España*. Recuperado de: [http://www.mityc.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/documents/estrategiaintegralveh%C3%ADculosel%C3%A9ctrico060410.pdf](http://www.mityc.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/documents/estrategiaintegralveh%C3%ADculosel%C3%A9ctricos060410.pdf)
- National Institute of Standards and Technology [NIST] (2010a). *NIST Framework and roadmap for Smart Grid interoperability standards* (Release 1.0). Recuperado de: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf
- NIST. (2010b). *NIST Identifies five “foundational” Smart Grid standards* (Press release). Recuperado de: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/smartgrid_100710.cfm
- Ngan, H.W. (2008). *A Smart Grid architecture for supporting open access to power grids*. Recuperado de: http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/full_paper_hw_ngan.pdf
- Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la información y telecomunicaciones. (2011, Mayo). *Smart Grids y la evolución de la red eléctrica*. Recuperado de: http://www.mityc.es/industria/observatorios/SectorElectronica/Actividades/2010/Federaci%C3%B3n%20de%20Entidades%20de%20Innovaci%C3%B3n%20y%20Tecnolog%C3%ADas%20de%20la%20RED_ELECTRICA.pdf
- Ramos, E. (2010, Junio). *El vehículo eléctrico. Su impacto en las redes del futuro*.

- Recuperado de http://www.asimelec.es/media/Ou1/Curso%20Verano%202010/Las%20TICs%20y%20el%20coche%20el%C3%A9ctrico_Enrique%20Ramos_Telvent.pdf
- Redorbit. (2009). *Energy efficiency technologies offer major savings*. Recuperado de: <http://www.redorbit.com/news/>
- Romatech. (2010, Junio) Smart Grids: incorporando inteligencia en las redes eléctricas. *Revista Electroindustria*, 74. Recuperado de: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1422&tip=9>
- Sonoma Innovation. (2009a) *Smart Grid communications architectural framework Smart Grid interoperability standards IP protocol & wireless/AMI*. Recuperado de: <http://www-users.cselabs.umn.edu/classes/Fall-2009/seng5861/project/a1ueNt4L.pdf>
- Sonoma Innovation. (2009b). *Smart Grid communications logical reference architecture*. Recuperado de: <https://mentor.ieee.org/2030/dcn/09/2030-09-0110-00-0011-smart-grid-communications-logical-reference-architecture.ppt>
- The GridWise Architecture Council. (2008, Marzo). *The GridWise® interoperability context-setting framework*. Recuperado de: http://www.gridwiseac.org/pdfs/interopframework_v1_1.pdf
- Torchia, M. (2011, Marzo). *Top 10 considerations in selecting a distribution area network for Smart Grids* (blog, IDC Energy Insights #EI226692). Recuperado de: http://www.smartgridnews.com/armchair/uploads/1/IDC_Exec_Brief_0311.pdf
- Trilliant (2009). *Empowering the Smart Grid*. Recuperado de: <http://mthink.com/utilities/utilities/trilliant-0>
- Verschueren, T., Haerick, W., Mets, K., Develder, C., De Turck, F. & Pollet, T. (2010). Architectures for smart end-user services in the power grid. *Network operations and management symposium workshops (NOMS, 2010 IEEE/IFIP. Osaka. 316 – 322. doi:10.1109/NOMSW.2010.5486557*
- Zpryme. (2010). *Smart Grid insights: V2G*. Recuperado de: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/10-5873.pdf>

Curriculum vitae

Carlos Andrés Díaz Andrade

Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle (Colombia) en 2004, con especialización en Redes y Comunicaciones de la Universidad Icesi (Cali, Colombia) en 2007. Estudiante de Maestría en Gestión Informática y Telecomunicaciones de la misma universidad. Se desempeña como jefe de innovación y nuevos proyectos en la empresa Integratic S.A.S., y como profesor en las cátedras de: Red de Sensores Inalámbricos, Principios de Hardware y Lógica Digital, en la Universidad Icesi. Entre sus áreas de interés están los sistemas inalámbricos y el diseño y desarrollo de aplicaciones con ZigBee, Wifi y Homeplug.

Juan Carlos Hernández

Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle (Colombia) en 2004. Estudiante de Maestría en Gestión Informática y Telecomunicaciones de la Universidad Icesi (Cali, Colombia). Se desempeña como ingeniero de desarrollo en la empresa Integratic S.A.S. Entre sus áreas de interés están el diseño de redes HAN (*Home Area Networks*) y los servicios IP.