

Capítulo 8 Infraestructura de telecomunicaciones para habilitar la Red Eléctrica Inteligente en México

Chapter 8 Telecommunications infrastructure to enable the Smart Grid in México

URIARTE-RAMÍREZ, Irma†*, BARBOZA-TELLO, Norma Alicia, MARTÍNEZ-PLATA, Daniela Mercedes y MEDINA-CASTRO, Paúl

Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

ID 1^{er} Autor: *Irma, Uriarte-Ramírez* / **ORC ID:** 0000-0002-9442-8731, **CVU CONACYT ID:** 671766

ID 1^{er} Coautor: *Norma Alicia, Barboza-Tello* / **ORC ID:** 0000-0002-1009-3672, **CVU CONACYT ID:** 46396

ID 2^{do} Coautor: *Daniela Mercedes, Martínez-Plata* / **ORC ID:** 0000-0003-2814-2820, **CVU CONACYT ID:** 314777

ID 3^{er} Coautor: *Paúl, Medina-Castro* / **ORC ID:** 0000-0003-3306-1494, **CVU CONACYT ID:** 42360

DOI: 10.35429/H.2020.5.141.156

I. Uriarte, N. Barboza, D. Martínez y P. Medina

irma_ur@uabc.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Las Red Eléctrica Inteligente (REI), conocida también como Smart Grid (SG) surge como respuesta a la necesidad de modernizar la red eléctrica actual, transformando la forma de distribuir, comercializar y consumir la energía. La REI proporciona una comunicación bidireccional entre proveedores de servicio y los usuarios conectados a ella. La infraestructura de telecomunicaciones es considerada como “la segunda red”, la cual es tan crítica en la operación de la REI como los elementos primarios. Por lo tanto, la infraestructura de telecomunicaciones deber ser planeada, diseñada, implementada y administrada con el mismo cuidado que la infraestructura eléctrica. En México se necesitan determinar los futuros usos y requerimientos de las telecomunicaciones y evaluar si las tecnologías existentes cumplen con estos requerimientos. El presente capítulo tiene por objetivo evaluar las tecnologías existentes o emergentes a través de una revisión de la literatura para el uso potencial de cada una ellas en la REI. Así también, se describen algunos de los retos a los que se enfrenta este nivel de la red.

Red eléctrica inteligente, telecomunicaciones, arquitectura de red

Abstract

The Smart Grid (SG) emerges in response to the modernization of the current power grid, transforming the way of distributing, marketing and consuming energy. The SG provides two-way communication between service providers and its connected users. In the SG the telecommunications infrastructure is considered as “the second network”, which is critical in the operation as the SG primary elements. Therefore, the telecommunications infrastructure must be planned, designed, implemented, and managed with the same care as the electrical infrastructure. In Mexico, it is necessary to determine the future telecommunications usage and requirements, and also it is indispensable to evaluate if the existing technologies will fulfill these requirements. This chapter is a literature review that aims to evaluate the current and emerging technologies as potential candidates to the SG, as well as, some challenges at network level are identified.

Smart Grid, telecommunications, network architecture

8. Introducción

El término red inteligente se usa comúnmente para referirse a la modernización del sistema eléctrico, en la que se emplean modelos nuevos y sostenibles para la producción, la distribución y el uso de energía a través de la incorporación de: comunicación generalizada y capacidad de monitoreo, funciones de gestión distribuidas y de control autónomo, como se muestra en la Figura 8.1. Las redes actuales son unidireccionales y a gran escala, con sistemas centralizados en los que la entrega de electricidad desde plantas de energía remotas se realiza a través de una distribución de árbol a los usuarios con perfiles de carga preestablecidos. Sin embargo, una serie de innovaciones han surgido en la última década que ha hecho obsoleto los sistemas de energía tradicionales y poco adecuados para cumplir con requisitos de confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad. Aunque existen diferentes puntos de vista sobre lo que será el modelo definitivo de una red inteligente, las siguientes capacidades son clave y esenciales para la implementación exitosa de la red (Ancillotti, Bruno, & Conti, 2013):

- Permitir el despliegue masivo y el uso eficiente de los recursos energéticos distribuidos, incluidas las fuentes de energía renovables y los sistemas de almacenamiento de energía.
- Mejorar la eficiencia y sostenibilidad de una red eléctrica mediante la incorporación de inteligencia distribuida en tiempo real permitiendo funciones automatizadas de protección, optimización y control.
- Permitir la interacción de los consumidores con los sistemas de gestión de energía para proporcionar la respuesta a la demanda y las funcionalidades de conformación de carga.
- Permitir en tiempo real una supervisión del estado y de las operaciones de la red, a través del uso de servicios de medición y monitoreo avanzados.

- Apoyar al sistema de transmisión de energía eléctrica facilitando el uso de vehículos eléctricos como un recurso energético móvil.

Figura 8.1 Red Eléctrica Inteligente



Fuente de Consulta: Recuperado de (CEDU, 2013)

Para que la red inteligente sea una realidad se necesita una infraestructura de comunicación sólida, confiable y eficiente que asegure el intercambio de información. En estas redes se espera la interconexión de muchos sistemas de comunicación. Sin embargo, los sistemas de comunicación actuales no están diseñados para sustentar las nuevas demandas de la red inteligente. Por esta razón, varios trabajos de investigación están orientados a la búsqueda de soluciones en lo referente a la tecnología de comunicación para habilitar la red. En (Gungor, y otros, 2011) los autores abordan cuestiones críticas sobre tecnología para la REI en términos de desafíos y oportunidades proporcionando una visión del estado de la tecnología. Por su parte (Ma, Chen, Huang, & Meng, 2013) identifican tres desafíos: la interoperabilidad de estándares, el acceso sin licencia y la seguridad. Los autores de (Ancillotti, Bruno, & Conti, 2013) presentan un modelo conceptual de la red basada en datos, donde identifican componentes funcionales, tecnologías, topologías de red y de servicios desde el punto de vista no sólo tecnológico sino también económico. En (Dileep, 2020) se exploran las tecnologías que conformarán la red, por ejemplo: sensores inteligentes, vehículos eléctricos, actuadores, etc. Describe también el uso del cómputo en la nube para las aplicaciones de REI. En lo que respecta a Latinoamérica en (Guido, 2020), plantea una visión bajo la perspectiva de la sociología de la implementación de una red inteligente en una ciudad de Argentina. Finalmente (León-Trigo, Reyes-Archundia, Gutiérrez-Gnecchi, & Méndez-Patiño, 2019) presentan un panorama general del estado de la REI en México y un estudio de viabilidad para construir una Micro REI.

En este capítulo se contribuye en el nivel de comunicación en la REI mediante la evaluación de las características de las tecnologías actuales para su posible uso en la red considerando el Programa de Redes Inteligentes (Energía, Documentos, 2017) de la SENER (Secretaría de Energía). La organización de las secciones restantes de este capítulo es la siguiente: en la sección 2 se describe la situación de la red en México y se describe el proyecto para la evaluación de tecnologías de comunicación por parte de la CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), CFE (Comisión Federal de Electricidad) Transmisión y Distribución. En la sección 3 se presenta la metodología, continuando con los resultados en la sección 4. Las conclusiones de este trabajo se encuentran en la sección 5.

8.2 Situación actual de la Red Inteligente en México

México como otros países de mundo, ha iniciado con la introducción del concepto de redes eléctricas inteligentes. Derivado de la Reforma Energética, en el nuevo marco legal de México, se realizaron importantes cambios en los temas relacionados con la planeación y operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), en la reforma se considera la incorporación de tecnologías de redes eléctricas inteligentes como un elemento importante que ayudará a conseguir los objetivos planteados sobre la materia. El desarrollo de redes inteligentes en el país incorpora tecnología digital en cada parte de la cadena del sistema de energía (generación, transmisión, distribución y consumo) y facilita la incorporación de las energías renovables a la matriz energética mexicana, la cual es capaz de mejorar la condición de desequilibrio entre la oferta y la demanda de electricidad. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) está llevando a cabo un proyecto para mejorar el intercambio de datos asociados con el consumo de energía, el control y seguimiento de las redes de distribución con el fin de supervisar y controlar los parámetros eléctricos de la red mediante el uso de la tecnología inalámbrica. Asimismo, en México se han realizado algunas actividades de investigación en torno al tema de las redes inteligentes, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (IEE) ha estado trabajando en los últimos años en un programa para ayudar al desarrollo del tema a nivel nacional (Gers, 2017). En mayo de 2016 se emitió el Programa de Redes Eléctricas Inteligentes y en 2017 se complementa con un documento donde se puntualizan los proyectos que será desarrollados por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), los transportistas y los distribuidores a corto, mediano y largo plazo.

En junio de 2019 la Secretaría de Energía (SENER) emitió el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019-2033 (Energía, Secretaría de Energía, 2019), cuyo Capítulo IX.5 contempla la transición hacia una Red Eléctrica Inteligente. De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) el despliegue de las REI debe contribuir a mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional con la incorporación de tecnologías avanzadas de medición, monitoreo, comunicación y operación entre otras, que facilite el acceso abierto sin discriminar a ningún sector a la Red Nacional de Transmisión (RNT) y las Redes Generales de Distribución (RGD) y permitir la integración de las fuentes de energías limpias y renovables.

De conformidad con el Artículo 37 de la Ley de Transición Eléctrica (LTE), la implementación de las REI tiene como objetivo apoyar la modernización de la RNT y de las RGD, para mantener una infraestructura confiable y segura que satisfaga la demanda eléctrica de manera económicamente eficiente y sustentable y que facilite la incorporación de nuevas tecnologías que promuevan la reducción de costos del sector eléctrico. El proyecto de REI contempla la integración de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en los elementos de medición, monitoreo y operación del Sistema Eléctrico Nacional, a través de los sistemas y módulos que los integran. Con respecto a esto último, en (Energía, Documentos, 2017) se considera que la infraestructura de telecomunicaciones de una empresa eléctrica es crítica para el funcionamiento óptimo de la red. Esta infraestructura se vuelve aún más crítica a medida que más dispositivos se comunican a través de ella y más aplicaciones requieren de datos en tiempo real. En el pasado, la infraestructura de telecomunicaciones a menudo fue instalada para realizar una tarea, por lo que pudiera no ser útil para los requerimientos del sector eléctrico. Muchas empresas eléctricas en el mundo están cambiando hacia un enfoque fragmentado y están desarrollando estrategias generales de telecomunicaciones que afectan a toda la empresa. A continuación, se enlistan algunas de estas estrategias:

- Promover la selección óptima de las tecnologías para satisfacer las necesidades de la empresa.
- Asegurar que la infraestructura de telecomunicaciones esté disponible cuando las aplicaciones la requieran.
- Optimizar el uso y la eficiencia de la infraestructura.
- Reducir el costo del ciclo de vida de la infraestructura.

8.3 Proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones”

En la actualidad, la infraestructura de telecomunicaciones es considerada como la “segunda red”, la cual es tan crítica en la operación de los sistemas eléctricos como los elementos primarios. Por lo tanto, la infraestructura de telecomunicaciones debe ser planteada, diseñada, implementada y administrada con el mismo cuidado que la infraestructura eléctrica.

Las nuevas responsabilidades adquiridas por parte del CENACE, CFE Transmisión y CFE Distribución, en el marco del Mercado Eléctrico Mayorista, requieren de una estrategia empresarial de telecomunicaciones que permita compartir información de manera confiable, puntual, segura y sin interrupciones relacionada con la operación del Sistema Eléctrico Nacional.

En (Energía, Documentos, 2017) se incluye el proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones” el cual tiene por objetivo “Determinar los usos futuros y requerimientos de telecomunicaciones para el CENACE, CFE Transmisión y CFE distribución y evaluar si las tecnologías existentes o emergentes cumplen con estos requerimientos. Los suministradores de servicios básico y calificado deberán adoptar los requerimientos tecnológicos que se alineen a la visión unificada y que sus sistemas sean capaces de comunicarse con facilidad a los dispositivos de la CENACE, CFE Transmisión o CFE Distribución”. El proyecto consiste en ocho fases que son necesarias para lograr la implementación de la estrategia de telecomunicaciones en los tres entes involucrados. Las fases 1 a 8 representan la fase de estudio del proyecto. La fase 9 es una demostración y la fase 10 es la implementación en toda la organización, en la Tabla 8.1 se describe cada una de las fases. Este proyecto definido para un período de cuatro años, permitirá identificar la infraestructura de telecomunicaciones que se implementará en el futuro en la REI en México.

Tabla 8.1 Fases del proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones”

Fase	Descripción
1. Documentar la Infraestructura existente de telecomunicaciones.	Establecer cuáles son las tecnologías con las que cuenta cada empresa, qué tan bien funcionan y dónde se encuentran en su ciclo de vida.
2. Determinar las nuevas aplicaciones que serán requeridas.	Desarrollar casos prácticos para establecer cuáles de las aplicaciones existentes y futuras de telecomunicaciones podrían ser aplicadas en los proyectos de REI.
3. Analizar los requerimientos de telecomunicaciones para las aplicaciones.	Definir los requerimientos tecnológicos para cada una de las aplicaciones de REI a desarrollar en el futuro y que además se adapten a la infraestructura de la empresa.
4. Considerar los aspectos geográficos de las aplicaciones y sus requerimientos.	Evaluar qué tecnologías serán utilizadas en zonas urbanas, suburbanas o rurales y cuál es la densidad de dispositivos de comunicación en cada una de ellas.
5. Analizar los objetivos a largo plazo y las oportunidades relacionadas con las telecomunicaciones.	Establecer un mapa de ruta de la tecnología a 10 años para vislumbrar cómo evolucionará cada una de las aplicaciones.
6. Desarrollar el portafolio de las tecnologías viables en telecomunicaciones.	Seleccionar las tecnologías que se adaptan a los requerimientos de cada empresa y que, a la vez, permitan el intercambio de información relevante entre las empresas del sector eléctrico sobre la operación confiable del SEN.
7. Visualizar los requerimientos particulares de las aplicaciones entre las empresas del sector.	Definir los requerimientos particulares de las aplicaciones y la distribución geográfica de las tecnologías viables.
8. Crear el mapa de ruta empresarial para la implementación de las tecnologías y realizar un análisis beneficio/costo.	Una vez seleccionadas las tecnologías se deberán valorar económicamente los beneficios de cada una de las tecnologías que cumplen con los requerimientos de infraestructura.
9. Llevar a cabo demostraciones de las nuevas tecnologías.	Se desarrollarán demostraciones para aquellas nuevas tecnologías o que no han sido implementadas en las empresas del sector eléctrico.
10. Implementar las tecnologías, a nivel sistema, que presenten los mejores resultados.	En caso de éxito en las demostraciones o de utilizar tecnologías ya probadas, se procederá a seleccionar las más adecuadas para implementarlas en todo el SEN.

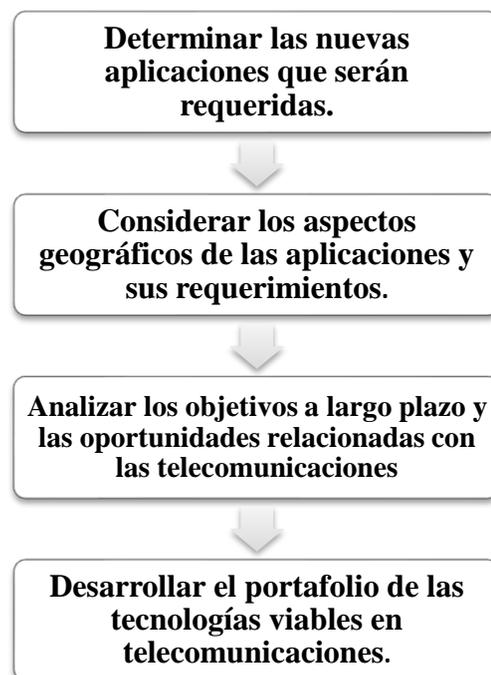
Fuente de Consulta: Elaboración propia con información de (Energía, Documentos, 2017)

8.4 Usos y requerimientos de las telecomunicaciones

8.5 Metodología

Se realizó una revisión documental y analítica por medio de la recolección de información y la revisión sistemática de la literatura para determinar los usos futuros y requerimientos de telecomunicaciones considerando algunas de las fases iniciales del Proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones” descrito en la Tabla 2.1. Las fases consideradas (Energía, Documentos, 2017) son: en la sección 3.2 se desarrolla la fase de 2, en 3.3 se da respuesta a la fase 3 y en 3.4 corresponde a la fase 4. La fase 6 se desarrolla en la sección de resultados, estas pueden observarse en la Figura 8.1. El resto de las fases no se aborda en este capítulo, ya que se requiere información particular de las empresas participantes y resultados de las implementaciones. Dentro de las tecnologías se consideraron las que actualmente forma parte de la infraestructura de la red eléctrica: OPLAT, microondas, fibra óptica, satélites y redes celulares. Esta sección también incluye tecnologías emergentes que pueden cumplir con la visión de la nueva red. Finalmente, se abordan los obstáculos a los que se enfrenta el nivel de comunicación.

Figura 8.1 Fases del Proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones” abordadas en este capítulo



Fuente de Consulta: Elaboración propia

8.6 Determinar las nuevas aplicaciones requeridas.

La operación completa de la REI se puede clasificar en múltiples aplicaciones. De acuerdo con el departamento de energía de los Estados Unidos, existen seis categorías en las que se encuentran, si no todas, sí la mayoría de las aplicaciones que a continuación se describen (Khan, Zeeshan, & Shahzad, 2018):

- 1) AMI (*Advanced Metering Infrastructure*): para recolectar, analizar y medir el consumo de energía con fines de facturación, gestión de la carga e información sobre interrupciones a través de comunicación bidireccional entre el consumidor y utilidad.
- 2) DRM (*Demand Response Management*): para reducir el consumo de energía a los usuarios cuando la red esta sobrecargada o en el período en el que el costo de la electricidad es más elevado.
- 3) WASA (*Wide-Area Situational Awareness*): para obtener en tiempo real el estado de operación de la red, utilizando tecnologías avanzadas para el monitoreo.

- 4) DER (*Distributed Energy Resources*): para el almacenamiento de energía a gran escala, suministros ininterrumpidos de energía y baterías de vehículos híbridos.
- 5) ET (*Electric Transportation*): dispositivos de almacenamiento de energía que inician funcionamiento cuando se detecta una baja de energía con el fin de equilibrar la demanda en la red.
- 6) DGM (*Distribution Grid Management*): para proporcionar una detección efectiva de fallas, con la capacidad de aislarlas y así restaurar la energía permitiendo a los proveedores de servicios el monitoreo y control de recursos de la red.

En la Tabla 8.2, se muestra la descripción cuantitativa de los requisitos en la calidad de servicio en términos de rendimiento, latencia, confiabilidad para cada aplicación y sub-aplicación de la REI.

Tabla 8.2 Requisitos de calidad en el servicio de las aplicaciones de REI.

Aplicación	Throughput (D)	Latencia (L)	Fiabilidad (R)	Tamaño de frame (Bytes)
AMI	10-100 kbps/nodo	2-15 seg	99-99.99	1500-2400
DRM	120 bps-100 kbps	500 ms	99-99.99	1500
WASA	600-1500 kbps	20-200 ms	99-99.99	1500
DER	9.6-56 kbps	20 ms-15 seg	99-99.99	500
ET	9.6-56 kbps	2 seg-5 min	99-99.99	1500
DGM	9.6-100 kbps	< 1 s (<i>alarmas</i>) < 100 ms (<i>msg</i>)	99-99.999	100-400

Fuente de Consulta: Recuperado de (Khan, Zeeshan, & Shahzad, 2018)

8.7 Analizar los requerimientos de telecomunicaciones para las aplicaciones

En una REI un elemento clave es la infraestructura de telecomunicaciones. En la visión que se tiene de la REI, una gran cantidad de datos provenientes de las diferentes aplicaciones de la red estarán generándose para análisis, control y facturación debido a esto es crítico que las empresas eléctricas definan los requisitos de comunicación y encuentren la mejor infraestructura para manejar datos y brindar servicio confiable, segura y rentable. La infraestructura de telecomunicaciones actual ya sea cableada o inalámbrica pueden utilizarse en esta nueva visión de red. En algunos casos la tecnología inalámbrica tiene ventajas sobre la cableada, por ejemplo, bajo costo en la infraestructura y facilidad de conexión para zonas difíciles. Sin embargo, puede presentar dificultades en la transmisión debido a atenuaciones o pérdida de señal. Por otro lado, los medios cableados no tienen problemas con interferencia y sus funciones no dependen de fuentes de energía como sucede con las tecnologías inalámbricas.

Básicamente, se necesitan dos tipos de infraestructura de información para el flujo de información en un sistema de red inteligente. El primer flujo es de los sensores y electrodomésticos a los medidores inteligentes, y el segundo flujo es entre los medidores inteligentes y los centros de datos de la empresa de servicios públicos. Se sugiere que el primer flujo de datos se puede dar a través de comunicación por línea eléctrica o comunicaciones inalámbricas como ZIGbee, 6 Low PAN, Z-wave y otros. Para el segundo flujo se puede utilizar tecnologías celulares o internet por cable. Sin embargo, hay factores limitantes clave que deben tomarse en cuenta en el proceso de implementación tales como tiempo de implementación, la disponibilidad de tecnología y entorno rural/urbano, interior/exterior, etc.

Se pueden utilizar muchas tecnologías de red para las comunicaciones ya sea en la transmisión, distribución y los clientes. Sin embargo, todavía no se adaptan completamente a las necesidades de las nuevas aplicaciones y necesitan ajustarse o probablemente elegir un subconjunto de tecnologías que puedan aplicarse a ciertas aplicaciones de la red que tengan requisitos similares.

Antes de elegir una tecnología de comunicación para una aplicación en particular, se requiere un análisis exhaustivo para que coincida con los requisitos de la aplicación.

Las tecnologías disponibles pueden clasificarse en las siguientes categorías (Wang, Xu, & Khanna, 2011):

- **Línea eléctrica.** Las líneas eléctricas se utilizan principalmente para transmisiones de energía eléctrica, pero también pueden utilizarse para transmisiones de datos. Los sistemas de comunicación a través de la línea de potencia operan enviando señales portadoras moduladas por los cables de transmisión. Por lo general las señales de datos no pueden propagarse a través de transformadores, por lo tanto, la comunicación por línea está limitada dentro de cada segmento de línea entre transformadores. Las velocidades de los datos en la línea eléctrica varían desde cientos de bits por segundo hasta millones de bits por segundo, en una relación inversamente proporcional a la longitud de la línea eléctrica. Por lo tanto, este tipo de comunicación se utiliza principalmente para entornos internos con el fin de proporcionar infraestructura de red de banda ancha si necesidad de instalar cables dedicados. A esta categoría pertenece la tecnología de Onda Portadora de Alta Tensión (OPLAT) como se le conoce en México a PLC (*Power Line Communication*).
- **Red cableada.** La comunicación por cable puede ser utilizado para construir redes de comunicación de datos que se encuentren distantes de las líneas de energía eléctrica. Estas redes dedicadas requieren una inversión adicional para la implementación, pero ofrecen una mayor capacidad de comunicación y poco retraso. Dependiendo del medio de transmisión utilizado, estas redes incluyen fibra óptica, DLS (*Digital Subscriber Line*) y la red de acceso por cable coaxial. Las redes de fibra óptica transmiten paquetes de datos de alta velocidad con tasas de datos entre 155 Mbps y 160 Gbps. La más popular de ellas es Ethernet sobre todo en los hogares y lugares de trabajo, proporciona una velocidad de datos entre 10 Mbps y 10 Gbps. El DSL y el cable coaxial se pueden usar para acceder a Internet con velocidades de transmisión de hasta 10 Mbps.
- **Red inalámbrica.** Permite conectar varios dispositivos remotos sin la necesidad de cables, en general las señales inalámbricas sufren de atenuación e interferencia durante la transmisión. Como resultado, estas redes pueden proporcionar conexiones de corta distancia con bajas velocidades de datos. Las redes 802.11 son las redes de área local más utilizadas con velocidades de hasta 150 Mbps y distancia de hasta 250 m. En una red personal, de aproximadamente 10 m de distancia, las redes 802.15 proporcionan conexiones inalámbricas velocidades entre 20 kbps a 55 Mbps. Para el acceso inalámbrico a internet de banda ancha, las redes 802.16 permiten transmisiones de hasta 100 Mbps en un rango de 50 km.

En la Tabla 8.3 se concentran las características de las tecnologías de comunicación vigentes que son candidatas a emplearse en la nueva red eléctrica. Se incluye también las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 8.3 Características de las tecnologías de comunicación vigentes.

Tecnología	Estándar/Protocolo	Tasa de datos	Cobertura	Ventajas	Desventajas
PLC	NB-PLC ISO/IEC 14908-3, ISO/IEC 14543-3-5. CEA-600.31 IEC 61334-3-1, IEC 61334-5	10-500 kbps	~150 km o más	-La infraestructura ya existe. -Separación física de otras redes de telecomunicaciones. -Bajos costos de operación.	-Distorsión y atenuación de la señal. -Interferencia. -Difícil de lograr tasas de datos altas. -Enrutamiento complejo.
	BB-PLC TIA-1113 IEEE 1901, ITU-T G.hn	14-200 Mbps	~1.5 km		-Los estándares evolucionan despacio.

Fibra óptica	AON IEEE 802.3ah BPON ITU-T G.983 EPON IEEE 1901 IEEE 802.3ah GPON ITU-T G.984 WDM SONET/SDH	100 Mbps 155-622 Mbps 1 Gbps 155-2448 Gbps 40 Gbps 10 Gbps	>10 km >20-60 km >10- 20 km >20-60 km >100 km >100km	-Velocidades de datos altas en distancias más largas. -Inmune a la interferencia electromagnéticas. -Baja latencia y retraso.	-Costos altos en la implementación de la red. -Equipo costoso. -No es recomendado para aplicaciones de medición. -Es difícil su actualización.
DSL	ADSL ITU G.992.1 ADSL2 ITU G.992.3 ADSL2+ ITU G.992.5 HDSL ITU G.991.1 VDSL ITU G.993.1 VDSL2 ITU G.993.1	1-8 Mbps 2 Mbps 15-100 Mbps	~ 4 km ~7 km ~7 km >3.6 km >1.2 km 300 m – 1 km	-Infraestructura de comunicación de larga distancia ya implementada. -Tecnología común para clientes residenciales de banda ancha.	-Es alto el costo de arrendamiento a los operadores de la red. -La tasa de datos se degrada a largas distancias.
Cable coaxial	DOCSIS	85 Mbps	~12 km	-Permite transmisión de voz, datos y video de manera simultánea. -No necesita repetidores.	-Puede operar únicamente y distancias muy cortas.
Microondas	IEEE 802.11	11 Mbps	>60 km	-Tasa datos alta.	-Sombreo. -Atenuación por las condiciones atmosféricas. -Interferencia multitrayectoria. -La latencia aumenta debido a la encriptación por seguridad.
WPAN*	ZigBee IEEE 802.15	256 kbps	10 – 75 m	-Bajo consumo de energía. -Equipo barato. -Apropiado para dispositivos de gama baja. -Compatible con IPV-6.	-Baja tasa de datos. -No es escalable.
WiFi*	IEEE 802.11e IEEE 802.11n IEEE 802.11s IEEE 802.11p	~54 Mbps ~600 Mbps ~26.7 Mbps ~ 40 Mbps	~ 300 m ~ 1 km	-Bajo costo en la implementación ya que no se necesita licencia para el uso del espectro. -Equipo de bajo costo. -Flexible y adecuado para diferentes usos.	-Presenta interferencia multiusuario. -El consumo de energía puede ser alto para los dispositivos de la REI. -Soporte simple de QoS.
WiMax*	IEEE 802.16 IEEE 802.16j IEEE 802.16m	75 Mbps	0 – 10 km 0 – 30 km	-Soporto miles de usuarios simultáneos. -Mayor cobertura que WiFi. -Control orientado a la conexión del ancho de banda del canal. -Mecanismos de QoS sofisticados.	-Manejo complejo de N/W. -Los costos de nodos terminales son altos. -Se necesita licencia para el uso del espectro.

Redes celulares*	2G GSM 2.5G GPRS 3G HSPA HSPA+ 3.5G HSDPA 4G LTE LTE Advanced	14.4 kbps 144 kbps 2 Mbps 12 Mbps 100 Mbps 1 Gbps	0-10 km 0-10 km 0-10 km 0-30 km	-Puede soportar decenas de millones de dispositivos. -Los nodos finales consumen menos potencia. -Los operadores celulares están adecuando soluciones para REI.	-Tiene que existir contrato de arrendamiento entre los operadores de la red celular y la REI. -Difícil garantizar el retraso que se espera.
Satélites*	LEO Iridium, Globalstar MEO New ICO GEO Inmarsat, BGAN, Swift, MPDS	1 Mbps	100- 6000 km dependiendo del número de satélites.	-Distancias largas, -Altamente confiable. -Se reduce la interferencia debido al espectro pagado.	-Terminales finales costosas. -Períodos de latencia mayores.

Fuente de Consulta: Elaboración propia con datos de (Alam, Sohail, Ghauri, Qureshi, & Aqdas, 2017), (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014), (Khan, Rehmani, & Reisslein, 2016), (Pérez-Guzmán, Salgueiro-Sicilia, & Rivera, 2017)

***Tecnologías inalámbricas.**

8.8 Tecnologías emergentes

En la literatura se registran propuestas para el empleo de las tecnologías de comunicaciones vigentes para consolidar la red eléctrica inteligente como las presentadas en la Tabla 3.2. En lo que respecta a las comunicaciones inalámbricas, el avance que han tenido en los últimos años, las convierte en candidatas para muchas de las aplicaciones de la REI. Una desventaja es que estas redes están reguladas por una política fija para asignar el espectro. La Radio Cognoscitiva (CR: *Cognitive Radio*) es una tecnología prometedora para el entorno REI, ya que puede aumentar la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión y debido a la escasez del espectro al aumento de las comunicaciones radio en bandas con y sin licencia hace que la implementación de CR sea casi inevitable (Alam, Sohail, Ghauri, Qureshi, & Aqdas, 2017). Una propuesta para que CR en REI sea una realidad es el utilizar IEEE 802.22 el cual es el primer estándar dirigido al uso del espectro de televisión analógica no utilizado con el objetivo de proporcionar acceso de banda ancha a zonas alejadas. Este estándar tiene varios modos de operación lo que lo hace un candidato para ser utilizado y tener comunicaciones confiables en la REI de naturaleza heterogénea. Este estándar puede transferir una gran cantidad de datos, se puede dar la comunicación bidireccional. En la Tabla 8.4 se resumen sus características.

Tabla 8.4 Características de WRAN

Tecnología	Estándar/Protocolo	Tasa de datos	Cobertura	Ventajas	Desventajas
CR WRAN	IEEE 802.22	18 Mbps	10 – 100 km	-Inmune a la interferencia. -Extensa cobertura de datos. -Niveles de potencia adaptiva.	-Susceptible a interrupción debido a la presencia del usuario con licencia.

Fuente de Consulta: Elaboración propia con información de (Khan, Rehmani, & Reisslein, 2016)

Los sistemas inalámbricos de quinta generación (5G) se están desarrollando actualmente. Estos sistemas están previstos para dar servicio a una alta densidad de dispositivos. Se prevé que los sistemas 5G interactúen con LTE, WiFi y Bluetooth para proporcionar una cobertura universal de alta velocidad y experiencias de usuario fluidas. Sin embargo, para su uso en REI se deben resolver varios desafíos como la estandarización y la interoperabilidad.

8.9 Considerar los aspectos geográficos de las aplicaciones y sus requerimientos.

Los avances en los sistemas de comunicación ofrecen a la nueva red eléctrica la posibilidad de controlar y monitorear a través de ella, con operaciones flexibles y efectivas a un menor costo. Las redes inteligentes son una oportunidad para utilizar las tecnologías de la comunicación y la información para adaptar los sistemas actuales de energía eléctrica a las necesidades de la nueva red (Díaz & Hernández, 2011). La red inteligente es una plataforma interactiva estructurada en capas o niveles. En la Figura 8.2 se observa cómo se puede implementar una REI. Estas capas o niveles son:

- La capa del sistema de energía, que consiste en la generación, transmisión, distribución y los clientes.
- La capa de control, que permite funciones de supervisión, control y gestión de las redes inteligentes.
- La capa de comunicación, que permite comunicaciones bidireccionales en un entorno inteligente.
- La capa de seguridad, que proporciona confidencialidad, integridad, autenticación y disponibilidad de la información.
- La capa de aplicación, que ofrece varias aplicaciones de la REI a clientes y empresas de servicios

Figura 8.2 Capas o niveles del modelo conceptual de la REI.

Medición inteligente y aplicaciones de la red			Aplicaciones del cliente				Capa de aplicación	
Autenticación, control de acceso, protección de integridad, encriptación, privacidad							Capa de seguridad	
Celular, WiMax, Fibra óptica			PLC, DSL, Cable coaxial, RF			ZigBee, WiFi		Capa de comunicación
WAN			NAN			HAN		
PMUs	Capacitores	Re-conectores	Interruptores	Sensores	Transformadores	Medidores	Almacenamiento	Capa de control de energía
Transmisión, generación			Distribución			Clientes		Capa del sistema de energía

Fuente de Consulta: Recuperado de (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014)

El nivel de comunicación es uno de los elementos críticos para habilitar las aplicaciones de la red inteligente. En el contexto de la REI, la red de comunicación se puede representar como una arquitectura jerárquica multicapas. De acuerdo a la velocidad de datos que maneja, rango de cobertura, esta se puede clasificar en (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014):

- Red para usuarios de área local, por ejemplo, Home Area Network (HAN), Building Area Network (BAN), Industrial Area Network (INS).
- Neighborhood Area Network (NAN) o Field Area Network (FAN).
- Wide Area Network (WAN).

Estas capas de la red, tiene muchas aplicaciones y diversos requisitos de calidad en el servicio, y por lo tanto se considera una red de características heterogéneas. La infraestructura de comunicación para la REI debe de cumplir con tres funciones: sensado, transmisión y control. El sistema de sensado embebido está a cargo de un gran número de medidores o sensores inteligentes que detectan en varios puntos el estado de la red en tiempo real. Se necesitan enlaces de transmisión de dos vías para establecer la comunicación de datos entre los sensores y los centros de control. Para lograr esos propósitos, la infraestructura de red de comunicación de la REI tiene que integrar nuevas tecnologías que permitan alcanzar las nuevas funciones. El despliegue de la REI será geográficamente amplio conectando un gran conjunto de nodos.

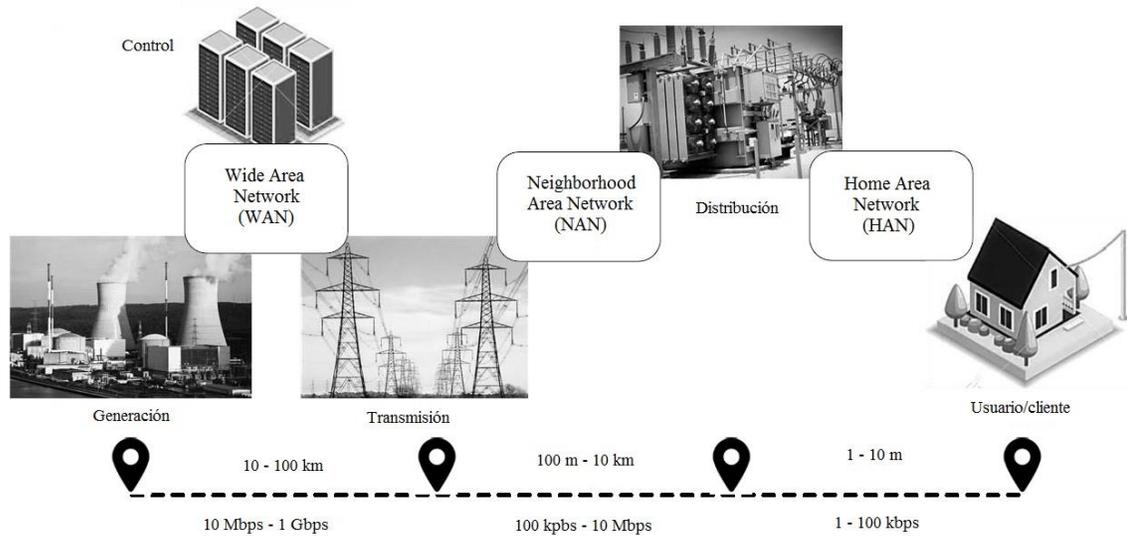
Por ende, la infraestructura de comunicación debe considerar que será una estructura multicapas que se extiende a través de toda la REI. En resumen, una HAN comunica varios dispositivos inteligentes para administrarlos de manera eficiente y respondiendo a las demandas de energía. Una NAN conecta a múltiples HAN a un punto de acceso local y finalmente la WAN provee enlaces de comunicación entre NANs y tiene los sistemas de utilidad para transferir información (Gao, Wang, Wang, & Song, 2012).

8.10 Descripción de los niveles de red de comunicaciones.

- Redes locales. Las redes HAN/BAN/IAN permiten la comunicación entre electrodomésticos, vehículos eléctricos y cualquier otro equipo eléctrico de los usuarios de la red. La HAN permite la comunicación entre electrodomésticos y equipos eléctricos que son capaces de enviar y recibir señales a medidores inteligentes, pantallas (IHDs: *in-home displays*) o sistemas para administrar energía (HEM: *Home Energy Management*). Estas aplicaciones incluyen hogares automatizados, control inteligente de temperatura ambiental, temperatura de los calentadores de agua, control y administración del consumo energía. Las redes BAN e IAN tiene propósitos comerciales e industriales relacionados con la automatización, ventilación, calefacción y aire acondicionado, y otras aplicaciones industriales de administración de la energía. También actúan como gateways entre HANs y NANs. Estas redes HAN/BAN/IAN necesitan enlaces de comunicación seguros, tasas de datos de 10 a 100kb/s y un área de cobertura de 100 a 200 m².
- Neighborhood Area Network (NAN). Este nivel de red permite la comunicación entre HAN y WAN (*Wide Area Network*), cubre el dominio de distribución y transmisión de la red eléctrica. Permite recolectar la información de los usuarios de la red para transmitirla a las compañías que proveen el servicio. A esta red también se la llama Field Area Network (FAN) ya que conecta también equipos de campo tal como equipos electrónicos inteligentes. Permite aplicaciones como mediciones inteligentes, gestión de cortes, supervisión de la calidad de la energía, automatización de la distribución, entre otras. También incluye una red de medición que es parte de la una de las aplicaciones de las REI llamada AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), permitiendo lecturas remotas de los medidores, control y detección de uso no autorizado. Permite que la información de uso de electricidad se transmita desde medidores de energía a una empresa de servicios públicos o un sistema de terceros permitiendo que los dispositivos de campo se controlen de forma remota, por ejemplo, en aplicaciones de automatización de distribución. NAN/FAN está conectado a WAN a través de una red, donde los datos de muchos NAN / FAN se agregan y transportan entre NAN / FAN y WAN. Dependiendo de la topología de la red eléctrica (centralizada / distribuida) y la tecnología de comunicación utilizada, un clúster NAN puede tener desde unos cientos hasta unos miles de SM (*Smart Meters*) que cubren varios kilómetros cuadrados y cada SM puede necesitar de 100 Kb / s a 10 Mb /s. Una NAN es una sección crítica en una REI ya que transporta un gran volumen de datos diversos e información de control entre proveedores de servicios en WAN y los dispositivos inteligentes en HAN.
- WAN. Este nivel es medular en la comunicación de una REI, ya que recopila información de múltiples NAN y la reenvía a un centro de control. Cubre los dominios de transmisión y generación de energía que permiten las comunicaciones de larga distancia entre diferentes puntos (DAP: *Data Aggregation Points*) de plantas de generación de energía, centros de control, subestaciones, redes de transmisión y distribución, estaciones de energía de recursos distribuidos, etc. Por lo tanto, maneja un volumen alto de datos de hasta miles de terabytes que se comunica a través de WAN al enlace con el centro de control, con una velocidad requerida de 10 a 100 MB/s, cubriendo cientos de kilómetros.

De acuerdo con la descripción de los niveles de red, la REI abarca una amplia área geográfica, por lo tanto, la infraestructura de comunicación debe tener suficiente cobertura para lograr la comunicación entre todos los elementos que la integran. Es por esta razón que se propone la estructura en tres capas. En la Figura 8.3 se puede observar la arquitectura de red recomendada de acuerdo al entorno, así como la velocidad de los datos requerida.

Figura 8.3 Descripción de la arquitectura de comunicación en la REI.



Fuente de Consulta: Recuperado de (Khan, Zeeshan, & Shahzad, 2018)

8.11 Retos del nivel de comunicaciones en una REI

Existen muchos retos asociados con la mejora de la infraestructura de comunicación actual para permitir los objetivos y aplicaciones de una REI. En resumen, los desafíos clave son los siguientes (Alam, Sohail, Ghauri, Qureshi, & Aqdas, 2017) (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014).

1. La red tiene diferentes requisitos a las redes de comunicaciones existentes, ya que estas se diseñaron bajo otras necesidades distintas a las actuales tales como velocidad de los datos, latencia, cantidad de usuarios, soporte de nuevas aplicaciones. Es también una tarea desafiante seleccionar las tecnologías y topologías existentes para ser utilizadas en la red REI.
2. Falta de estándares para la interoperabilidad, mismos que son necesarios para el despliegue efectivo de las redes de comunicación en un entorno REI ya que esta red se visualiza en un entorno heterogéneo (Het-Net: *Heterogeneous Network*).
3. Otro reto se presenta en la infraestructura inalámbrica actual, ya que las redes inalámbricas convencionales están reguladas por políticas fijas para la asignación del espectro, en donde esta asignación fija resulta ser ineficiente para utilizar dicho espectro. En otras palabras, la REI se enfrenta a la escasez del espectro radioeléctrico.
4. La integración a la red eléctrica actual de otras fuentes de energía es también un reto al que se enfrenta esta propuesta de red.
5. La seguridad de la red también es un punto crítico, existen investigaciones relacionadas con la búsqueda de mecanismos de seguridad para asegurar confiabilidad e integridad a la información de los usuarios.

8.12 Resultados

Con base a la información consultada y dando seguimiento al proyecto “Estrategia empresarial de telecomunicaciones” en lo que respecta a la fase 7 donde se solicita definir los requerimientos particulares de las aplicaciones y la distribución geográfica de las tecnologías viables, se presenta la Tabla 8.5 que presenta cada una de las tecnología presentadas en la sección 3 con las aplicaciones a las que puede dar soporte, así como la arquitectura de red de acuerdo a la distribución geográfica donde pueda ser implementada.

Tabla 8.5 Tecnologías viables para habilitar la REI.

Tecnología	Aplicaciones	Arquitectura
PLC	Lectura de medición automática Distribución de bajo voltaje	HAN, NAN, AMI
Fibra óptica	Infraestructura física de la red	NAN, WAN
DSL	Red de ciudad inteligente Medición inteligente	HAN, NAN, WAN, AMI
Cable coaxial	Medición inteligente	NAN
Microondas	Alarmas entre DERs Alimentador de subestación de distribución.	HAN, NAN
WPAN	Iluminación inteligente Monitoreo de energía Automatización de hogares Lectura de medición automática	HAN, AMI
WiFi	Medición inteligente Automatización de hogares	NAN, HAN, AMI
WiMax	Lectura de medición automática inalámbrica Facturación en tiempo real Detección y restablecimiento de fallas	HAN, AMI
Redes celulares	SCADA (<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>) Monitoreo y medición de DERs	HAN, NAN, AMI
Satélites	SCADA Servicios de respaldo en comunicaciones Servicios de transporte para AMI	AMI, WAN
CR WRAN	Medición inteligente SCADA Manejo de la respuesta de demanda Monitoreo de área ancha Control y protección	HAN, NAN, WAN, AMI

Fuente de Consulta: Elaboración propia

8.13 Conclusiones

México, como muchos otros países de Europa y América, se encuentra en el periodo de transición a la Red Eléctrica Inteligente (REI). De acuerdo con (Gers, 2017) todavía existen preguntas abiertas sobre el proceso de normalización, selección de aplicaciones de redes inteligentes y aspectos regulatorios.

En México, desde 2012 se iniciaron proyectos con miras a implementar la REI, proyectos tales como la incorporación de alternativas energéticas al actual Sistema Nacional Eléctrico (SEN), integración de medidores inteligentes, modernización de la red de distribución, entre otros. Con la REI se pretende mejorar la operación del SEN, incrementando la eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad; promoviendo la generación de electricidad proveniente de fuentes de energía limpia; optimizando la dinámica de operación; apoyando en la gestión al Mercado Eléctrico Mayorista; incorporando Generación Distribuida; interactuando con los usuarios del sistema.

Es un hecho que, para esta visión, la infraestructura de comunicación es medular para el buen funcionamiento de la misma, de ahí la importancia de la selección de las tecnologías a emplearse, siendo necesario evaluarlas y analizarlas valorando el costo beneficio. De acuerdo con el análisis documental aquí presentado las tecnologías de comunicación existentes sí son capaces y suficientes para cubrir las necesidades de la REI en nuestro país, obviamente con las adecuaciones necesarias. Sin embargo, en lo que respecta a las tecnologías inalámbricas existen todavía algunos detalles de confiabilidad, seguridad y gestión del espectro que es necesario solucionar.

8.14 Referencias

- Alam, S., Sohail, F. M., Ghauri, S. A., Qureshi, I., & Aqdas, N. (2017). Cognitive radio based Smart Grid Communication Network. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 535-548.
- Ancillotti, E., Bruno, R., & Conti, M. (2013). The role of communication system in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges. *Computer Communications*, 1665-1697.
- CEDU. (28 de Noviembre de 2013). *Camara Empresaria de Desarrolladores Urbanos*. Obtenido de CEDU: http://www.cedu.com.ar/cedu_new/noticias/compromiso-ambiental/1467-redes-electricas-inteligentes-la-nueva-tendencia-que-permite-ahorrar-un-30-de-energia.html
- Díaz, C., & Hernández, J. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica. Estado del Arte. *S&T*, 9(18), 53-81.
- Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 2589-5625.
- Energía, S. d. (21 de Agosto de 2017). *Documentos*. Obtenido de Secretaría de energía: <https://www.gob.mx/sener/documentos/programa-de-redes-electricas-inteligentes-121753>
- Energía, S. d. (14 de 06 de 2019). *Secretaría de Energía*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/prodesen-2019-2033-221654>
- Gao, J., Wang, J., Wang, B., & Song, X. (2012). Cognitive Radio Based Communication Network Architecture for Smart Grid. *IEEE International Conference on Information Science and Technology*. Wuhan, Hubei, China.
- Gers, J. M. (2017). América Latina y el Caribe: Estado del Arte de las Redes Eléctricas Inteligentes. *ENERLAC*, 24-41.
- Ghassemi, A., Bavarian, S., & Lampe, L. (2010). Cognitive Radio for Smart Grid Communication. *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications* (págs. 297-302). Gaithersburg, MD, USA: IEEE.
- Giral-Ramírez, W., Celedón-Flórez, H., Galvis-Restrepo, E., & Zona-Ortiz, A. (2017). Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: Revisión de tema. *Tecnura*, 119-137.
- Gómez, V. A., Hernández, C., & Rivas, E. (2018). Visión General, Características y Funcionalidades de la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid). *Información Tecnológica*, 29(2), 89-102.
- Guido, L. (2020). Opciones y dilemas socio-técnicos en los desarrollos energéticos argentinos: el proyecto red inteligente en la Ciudad General San Martín, Mendoza. *Revista Huellas*, 11-30.
- Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S. B., Cecati, C., & Hancke, G. (2011). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *Transaction on Industrial Informatics*, 529-539.
- Khan, A., Rehmani, M., & Reisslein, M. (2016). Cognitive Radio for Smart Grids: Survey of Architectures, Spectrum Sensing Mechanisms, and Networking Protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 860-897.
- Khan, M., Zeeshan, M., & Shahzad, K. (2018). On Performance Analysis of IEEE 802.22 PHY for Cognitive Radio based Smart Grid Communications. *Smart Cities Conference (ISC2)*. Kansas City, MO, USA.
- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2014). Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. *Computer Networks*, 74-88.

León-Trigo, L., Reyes-Archundia, E., Gutiérrez-Gnecchi, J., & Méndez-Patiño, A. C.-C. (2019). Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1-12.

Ma, R., Chen, H., Huang, Y., & Meng, W. (2013). Smart Grid Communications: Its Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 36-45.

Pérez-Guzmán, R., Salgueiro-Sicilia, Y., & Rivera, M. (2017). Communication systems and security issues in smart microgrids. *IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)* (págs. 1-6). Puerto Varas: IEEE.

Wang, W., Xu, Y., & Khanna, M. (2011). A survey on the communications architectures in smart grid. *Computer Networks*, 3604-3629.