

Diseño y evaluación de desempeño de la infraestructura AMI para la microrred de la Universidad de Nariño

Design and Performance Assessment of the AMI Infrastructure for the Universidad de Nariño's Microgrid

Álvaro José Cervelion-Bastidas¹✉, Guefry L. Agredo-Méndez²,
Javier Revelo-Fuelagán³

¹ Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

² Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

³ Universidad de Nariño, Pasto, Colombia



✉ Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Campus de Tulcán, Carrera 2 n.º 15N Esquina, Popayán, Cauca, Colombia. Correo electrónico: alvarocervelion@unicauca.edu.co

Recibido: abril 15 del 2018

Aprobado: junio 30 del 2018

Disponible en línea: septiembre 1 del 2018

Cómo citar este artículo: A. J. Cervelion-Bastidas, G. L. Agredo-Méndez y J. Revelo-Fuelagán, "Diseño y evaluación de desempeño de la infraestructura AMI para la microrred de la Universidad de Nariño", *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 14, no. 26, 2018. doi: <https://doi.org/10.16925/in.v14i26.2418>

Resumen

Introducción: en este artículo, se presenta el diseño y la evaluación de desempeño de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI, por sus siglas en inglés) para una microrred. Esta infraestructura permite la recopilación de datos de medición de los consumidores en un centro de gestión, fundamental en la construcción de una microrred.

Objetivo: diseñar la red de comunicaciones, y seleccionar los equipos y el sistema de gestión para la AMI en la microrred de la Universidad de Nariño.

Metodología: revisión bibliográfica de los aspectos a considerar en el diseño de la AMI como topologías, tecnologías y protocolos de comunicación, además de las métricas para evaluar el desempeño de la AMI.

Resultados: se presenta el diseño de la AMI contemplando equipos de medición, red de comunicaciones y centro de gestión. Una vez la AMI fue implementada, se realizó la evaluación de desempeño según los parámetros de latencia, ancho de banda, rendimiento (*throughput*) y pérdida de paquetes.

Conclusión: los resultados indican que la AMI cumple con los parámetros de calidad de servicio, garantizando un óptimo flujo de información en la microrred.

Originalidad: si bien varias iniciativas han sido enfocadas al diseño de soluciones basadas en microrredes y de infraestructuras AMI, y al estudio de sus impactos, la implementación de estas redes es aún escasa en Colombia.

Limitaciones: en este estudio, para la evaluación de desempeño de la red de comunicaciones, se ha contemplado el rendimiento de los canales de comunicación, sin tener en cuenta el rendimiento de los diferentes protocolos utilizados como Modbus/TCP y DNP3/TCP.

Palabras clave: calidad de servicio, control y adquisición de datos (SCADA), Infraestructura de Medición Avanzada, medidores inteligentes, microrred, supervisión.



Design and Performance Assessment of the AMI Infrastructure for the Universidad de Nariño's Microgrid

Abstract

Introduction: This article presents the design and performance assessment of the Advanced Metering Infrastructure (AMI) for a microgrid. This infrastructure enables the collection of consumer measurement data in a management center, essential to the construction of a microgrid.

Aim: To design the communications network and select the equipment and management system for the AMI in the Universidad de Nariño's microgrid.

Methods: Literature review of the aspects to be considered in AMI design such as communication topologies, technologies and protocols, in addition to the metrics to assess AMI performance.

Results: The AMI design is presented including measurement equipment, communications network and management center. Once the AMI was implemented, its performance was assessed according to the parameters of latency, bandwidth, throughput and packet loss.

Conclusion: The results suggest that the AMI meets the quality of service parameters, ensuring an optimal data flow in the microgrid.

Originality: While several initiatives have focused on the design of solutions based on microgrids and AMIs and on the study of their impacts, the implementation of these grids is still limited in Colombia.

Limitations: For assessing the performance of the communications network, this study has considered the performance of communication channels, excluding the performance of various protocols used such as Modbus/TCP and DNP3/TCP.

Keywords: quality of service, control and acquisition (SCADA), Advanced Measurement Infrastructure, smart meters, microgrid, data monitoring.

Desenho e avaliação de desempenho de infraestrutura AMI para a micro-rede da Universidad de Nariño

Resumo

Introdução: este artigo apresenta o desenho e a avaliação de desempenho da Infraestrutura de Medição Avançada (AMI, pela sua sigla em inglês) para uma micro-rede. Essa infraestrutura permite a coleta de dados de medição dos consumidores em um centro de gerenciamento, que é fundamental na construção de uma micro-rede.

Objetivo: projetar a rede de comunicação e selecionar o equipamento e o sistema de gerenciamento para o AMI na micro-rede da Universidad de Nariño.

Metodologia: revisão bibliográfica dos aspectos a serem considerados no design do AMI, como topologias, tecnologias e protocolos de comunicação, além das métricas para avaliar o desempenho do AMI.

Resultados: o desenho do AMI foi apresentado considerando equipamentos de medição, rede de comunicação e centro de gerenciamento. Uma vez implementado o AMI, a avaliação de desempenho foi realizada de acordo com os parâmetros de latência, largura de banda, *throughput* e perda de pacotes.

Conclusão: os resultados indicam que o AMI atende aos parâmetros de qualidade do serviço e garante um fluxo ótimo de informações na micro-rede.

Originalidade: embora várias iniciativas tenham sido focadas no design de soluções baseadas em micro-redes e infraestruturas AMI, bem como no estudo de seus impactos, a implementação dessas redes ainda é escassa na Colômbia.

Limitações: este estudo considerou o desempenho dos canais de comunicação para avaliar o da rede de comunicação, sem levar em consideração o desempenho dos diferentes protocolos utilizados, como Modbus/TCP e DNP3/TCP.

Palavras-chave: qualidade do serviço, Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), Infraestrutura de Medição Avançada, medidores inteligentes, micro-rede.

Introducción

El crecimiento en la demanda de energía eléctrica a causa del desarrollo de la economía y del crecimiento de la población mundial ha llevado a buscar nuevas alternativas de generación eléctrica que cubran estas necesidades y que mitiguen el alto impacto ambiental que generan los procesos de producción de energías convencionales. Con la constante expansión de la red eléctrica, las deficiencias del sistema de energía a gran escala son cada vez más evidentes, provocando interrupciones en el servicio, incapacidad para aumentar la generación, pérdidas en la transmisión, sobrecargas y caídas de tensión.

Actualmente, una de las alternativas que permite mejorar la eficiencia en el uso de la energía es el concepto de *red inteligente*. La red inteligente se asocia a la combinación de modernas tecnologías de la información con la red eléctrica tradicional, que abarca generación, transmisión, distribución y usuarios finales, permitiendo la optimización en la producción y distribución de electricidad.

De igual manera, una microrred tiene las mismas características de una red inteligente, pero abarca un área más pequeña, generalmente la red de distribución y usuarios finales y ubicada a continuación de una subestación alimentadora. Además, integra fuentes de energía distribuida (DER, Distributed Energy Resources), como es el caso de las energías renovables entre ellas la solar, la biomasa y la eólica, entre otras.

Todas las funcionalidades y ventajas de una microrred no serían viables si no se contara con una infraestructura de comunicaciones capaz de soportar el flujo de información que la microrred necesita para su correcto funcionamiento. Es así como surge el concepto de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), que permite recopilar los datos de medición de los consumidores en un centro de gestión. La AMI es un sistema capaz de capturar el consumo de energía en tiempo real, y además permite el despliegue de nuevas aplicaciones, como conexión y desconexión remota, detección de interrupciones, identificación temprana de posibles fallas, y monitoreo y administración de energía.

Por lo general, la AMI consta de tres componentes principales: los medidores inteligentes, la red de comunicaciones y el centro de gestión. El éxito o el fracaso de un sistema AMI se basa en un buen diseño de la red de comunicaciones y en la elección

de los equipos de medida. La red de comunicaciones debe cumplir con algunos parámetros de calidad de servicio (QoS) como latencia, ancho de banda, *throughput* (rendimiento) y pérdida de paquetes que garanticen que las tecnologías utilizadas cubran con las necesidades de la red. En cuanto a los equipos de medida, se deben considerar aspectos como variables eléctricas medibles, rangos de medición, precisión, puertos y protocolos de comunicación.

En Colombia, se han desarrollado varias iniciativas en torno a las microrredes, que se enfocan en aspectos como: simulaciones de respuesta a la demanda, descripción de las funcionalidades de AMI en Colombia y modelamiento del flujo de energía, entre otros. A pesar de ello, la implementación de estas redes es aun escasa. Esto motivó a la Universidad de Nariño a implementar una microrred con interconexión a red en su campus universitario, la cual permitirá realizar diversos estudios y posicionar a la institución como pionera en el uso de las redes eléctricas inteligentes a nivel nacional.

Esta investigación se adelantó en el marco del proyecto “Análisis de Oportunidades Energéticas con Fuentes Alternativas en el Departamento de Nariño —ALTERNAR—”, que en uno de sus objetivos se propone diseñar e implementar una microrred en el campus universitario de la Universidad de Nariño. En el presente artículo, se describe el diseño y la evaluación de desempeño del sistema AMI para la microrred del campus universitario. Primero, el trabajo se enfocó en el diseño de la red de comunicaciones según las necesidades de la microrred. Para ello, se consideran aspectos como topologías, tecnologías y protocolos de comunicación, teniendo en cuenta la topografía y la ubicación de los diferentes elementos de la microrred dentro del campus universitario. Después, se realizó la elección de los medidores inteligentes y el centro de gestión. Una vez implementada la red de comunicaciones, se evaluó su desempeño bajo los parámetros de QoS descritos anteriormente.

Estado del arte

En muchos países del mundo, se han emprendido diversos proyectos que buscan el aprendizaje, la transferencia y el desarrollo tecnológico en todos los componentes de las redes inteligentes. García [1] presenta en su investigación los elementos principales que componen la infraestructura AMI

de Telegestore, sistema instalado por la empresa eléctrica italiana ENEL a finales del 2013. La infraestructura cuenta con medidores inteligentes, concentradores (colectores), redes de comunicaciones (PLC y celulares) y un sistema central de administración de medidores. En el 2009, el Departamento de Energía de Estados Unidos presentó un informe que describía las principales tecnologías que se incluirían en las infraestructuras de comunicaciones, la seguridad cibernética asociada a estas infraestructuras y un resumen del estado de la implementación de proyectos y pruebas piloto AMI desarrollados por las empresas de servicios públicos [2].

Vondrous et al. [3] proponen una metodología para la evaluación de sistemas de comunicación en redes inteligentes. Esta metodología se pone a prueba en una AMI real utilizando Comunicación por Línea de Potencia (PLC) [3]. Cataliotti et al. [4] presentan en su investigación una arquitectura de comunicaciones para un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition), que monitorea y controla dispositivos electrónicos inteligentes conectados a redes de distribución de baja tensión. A su vez, Quang et al. [5] desarrollan pruebas experimentales en una red inteligente piloto en la isla de Favignana, Italia.

En el 2013, Quang et al. [5] presentaron el artículo “Open-Source Testing Tools for Smart Grid Communication Network”, en el que se menciona que la mayoría de los trabajos de investigación realizados antes se centran solo en una o dos medidas de rendimiento y que las diversas tecnologías de comunicación crean grandes desafíos en el *software* de prueba. Dado lo anterior, se analiza y se determina el conjunto de herramientas más adecuado para evaluar el rendimiento de la red de comunicaciones de la red inteligente.

En cuanto a este aspecto, en el presente trabajo se busca evaluar las métricas de calidad necesarias que permitan conocer detalladamente el desempeño de la red implementada. En su investigación, Jeon [6] concluye que la construcción eficiente de la red inteligente necesita una infraestructura de comunicaciones altamente confiable, escalable, segura, robusta y rentable que admita los requisitos de QoS. Por lo tanto, se presentan los requisitos de QoS para el sistema de comunicaciones de la red inteligente, los cuales se tienen en cuenta para el presente trabajo.

De igual manera, en Colombia se han adelantado investigaciones al respecto, como la realizada por Álvarez et al. [7], en el 2015, cuyo proyecto se desarrolló e implementó en el campus de la Universidad Nacional de Colombia, pues se enfocó en la implementación de una plataforma de gestión energética en tiempo real [7]. Por otro lado, Pantoja et al. [8] ejecutaron en la Universidad de Nariño el proyecto “Análisis de Oportunidades Energéticas con Fuentes Alternativas en el Departamento de Nariño —ALTERNAR—”, en el que se realizó un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema prototipo de red inteligente en el campus universitario para la apropiación e investigación de nuevas tecnologías en sistemas de distribución y generación con fuentes alternativas [8].

Metodología

En este apartado, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo. Inicialmente, se realizó una revisión detallada de la literatura existente sobre el área de investigación para la recopilación de datos relevantes en cuanto a topologías, tecnologías y protocolos de comunicación utilizados en microrredes.

Luego, se eligieron las diferentes métricas de rendimiento que permitirían evaluar apropiadamente la aplicación a implementar. A continuación, teniendo en cuenta las necesidades y el entorno de desarrollo, se realizó el diseño de la red de comunicaciones para la microrred del campus universitario, considerando equipos de medición y de comunicación y el centro de gestión.

El siguiente paso fue la evaluación de desempeño de la red de comunicaciones, con el fin de verificar el cumplimiento de los requerimientos de QoS. Finalmente, se presentaron los resultados y las conclusiones del trabajo.

Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

Una Infraestructura de Medición Avanzada (AMI, Advanced Metering Infrastructure) está definida como un sistema capaz de recolectar información de medición cada cierto periodo, con el fin de transmitirla por un canal de comunicaciones para su adecuada recepción en un sistema de recolección

y análisis de datos [2]. La arquitectura general de la AMI se puede observar en la figura 1.

Como se puede observar en la figura 1, la arquitectura AMI consta de tres componentes principales clasificados en niveles, que se describen a continuación [10]:

Nivel 1: es la capa superior de la infraestructura y corresponde al centro de gestión de datos y al centro de manejo de comunicaciones. En este nivel, se recolecta la información de los medidores para su respectivo análisis, procesamiento y almacenamiento, en aplicaciones como: el sistema de gestión de interrupciones (OMS, Outage Management System), encargado de la restauración ante eventuales cortes de energía; y el sistema de gestión de energía (EMS, Energy Management System) utilizado para controlar y optimizar el rendimiento en la generación y transmisión de energía y del sistema SCADA.

Nivel 2: es la capa de acceso, la cual provee los canales de comunicación que hacen posible la comunicación bidireccional entre el centro de gestión y los medidores inteligentes.

Nivel 3: corresponde a los medidores inteligentes, que se encargan del registro de variables asociadas al consumo eléctrico.

Según la definición de AMI, la red de comunicaciones es el eje principal, por lo tanto su correcto diseño sugiere un buen funcionamiento de la infraestructura. Cada microrred posee características comunes (como la interconexión de equipos de medida y la instalación de un *software* de gestión) y únicas (como la topografía del terreno, la distancia y ubicación de los diferentes elementos dentro de ella). Por eso, para el diseño de la red de comunicaciones es necesario considerar los aspectos que se describen en las siguientes secciones.

Jerarquía de las redes de comunicaciones

En orden jerárquico y dependiendo del área de cobertura, las redes de comunicaciones para AMI se pueden dividir en tres:

Red de Área Doméstica

La Red de Área Doméstica (HAN, Home Area Network) pertenece al dominio del cliente y se compone de electrodomésticos y sensores. Estos dispositivos reportan información del uso de energía al medidor inteligente, que a su vez la envía a la red central. Los medidores inteligentes también reciben instrucciones sobre el uso de electricidad y pueden activar o desactivar cargas [11].

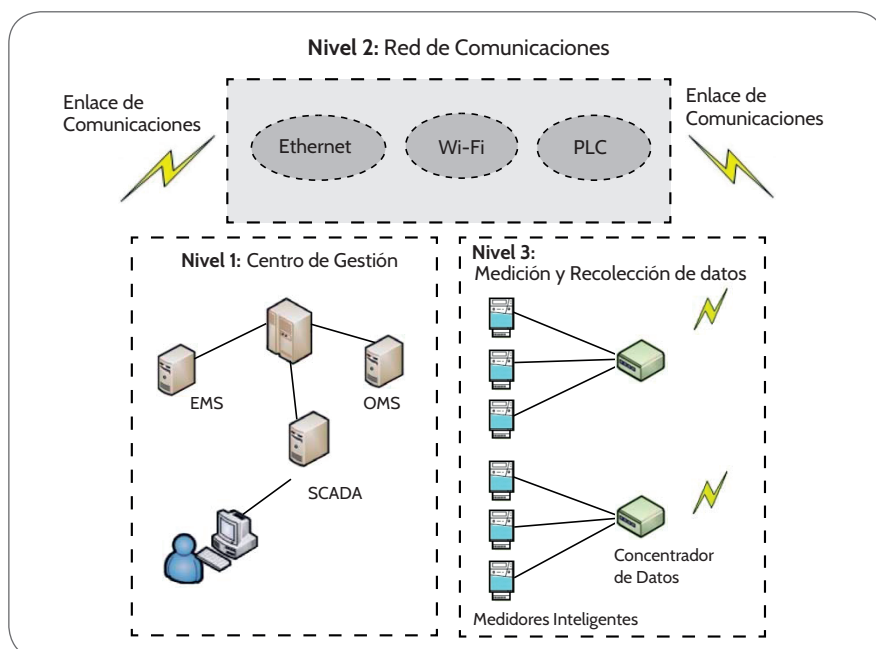


Figura 1. Diagrama de bloques AMI

Fuente: adaptada de [9].

Red de Área de Vecindario

La Red de Área de Vecindario (NAN, Neighborhood Area Network) tiene como función permitir la comunicación de los medidores inteligentes con el centro de gestión. Las NAN se despliegan al aire libre y pueden constar de decenas a miles de medidores inteligentes en una cobertura de hasta diez kilómetros cuadrados [12].

Red de Área Amplia

La Red de Área Amplia (WAN, Wide Area Network) conecta varias NAN con la red de *backhaul* o *gateways* para remitir la información al centro de gestión. El área de cobertura es mayor a miles de kilómetros cuadrados aproximadamente [12]. En la figura 2, se aprecia el área de cobertura de cada red.

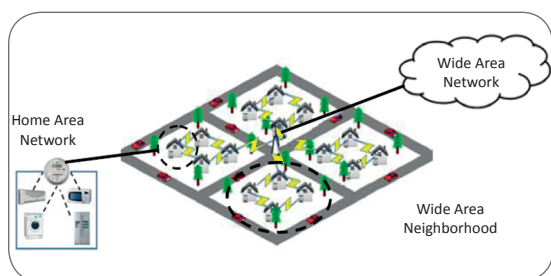


Figura 2. Red de comunicaciones HAN, NAN y WAN en redes inteligentes

Fuente: [12]

Topologías de comunicación

La topología es el arreglo físico de los elementos dentro de una red y define la cadena de comunicación usada por los nodos que conforman la red para comunicarse. Las topologías usualmente empleadas en AMI son: estrella, bus, árbol y malla. La decisión de elegir alguna de ellas depende de aspectos como la cantidad de equipos a interconectar, los costos de implementación, la ubicación geográfica y la accesibilidad. Dado lo extensa y heterogénea que puede llegar a ser una red AMI, una topología híbrida es generalmente la mejor opción, ya que se adapta a la variedad de tipos de redes y/o componentes presentes en la red [5]. A continuación, se enuncian las características, las

ventajas y las desventajas de cada una de las topologías de comunicación.

Topología en estrella

Posee un nodo central que se conecta directamente con los nodos periféricos, lo cual permite una mayor velocidad de comunicación entre estos nodos. El fallo de un nodo periférico no afecta el funcionamiento de la red. La desventaja de esta topología radica en que toda la carga de tráfico recae sobre el nodo central y un fallo de este nodo puede dejar inoperante a toda la red.

Topología en bus

Tiene un único canal de comunicaciones, denominado *bus*, al cual se conectan los diferentes nodos. De esta forma, todos los nodos comparten el mismo canal para comunicarse entre sí. Requiere menos cable que una topología en estrella y es fácil conectar nuevos nodos, lo que permite su extensibilidad y su fácil expansión. Las desventajas son que es difícil detectar el origen de un problema ante un fallo de la red y que toda la red fallaría si hubiera una ruptura en el cable principal o bus de datos.

Topología en árbol

Esta topología combina características de la topología en estrella con la de bus. Consiste en un conjunto de subredes estrella conectadas a una subred bus. Esta topología facilita el crecimiento de la red. Los nodos periféricos, que requieren transmitir y recibir solamente de otro nodo, no necesitan de repetidores o regeneradores. Si falla un enlace que conecta con un nodo hoja, ese nodo hoja queda aislado, pero si falla un enlace con un nodo que no sea hoja, la sección entera queda aislada del resto.

Topología en malla

En esta topología, un nodo periférico puede comunicarse con otros nodos, por lo que no requiere de un nodo central. La ventaja de esta topología es que la información de un nodo puede tomar diferentes rutas, por lo tanto en un eventual fallo de un nodo, la información podrá tomar otra ruta. La desventaja de esta topología es que cada nodo se sobrecarga con la información de los nodos anteriores a él, lo cual aumenta los retardos en la comunicación.

Tecnologías de comunicación

Son los mecanismos que permiten la comunicación entre dos nodos y se clasifican en dos tipos: cableadas e inalámbricas. En aplicaciones de redes AMI, existen diferentes ventajas y desventajas asociadas a estas tecnologías. Para elegir la tecnología correcta, se requiere un análisis de las necesidades, evaluar la infraestructura existente y tener en cuenta factores como el impacto en equipos antiguos, la funcionalidad, requerimientos técnicos y el factor económico de la implementación [13].

En ciertas situaciones, las tecnologías inalámbricas tienen ventajas sobre las tecnologías cableadas, como bajo costo y facilidad de conexión, pero sufren de interferencia y atenuación de la señal. Por otra parte, las tecnologías de comunicación cableadas son más fiables, menos propensas a la interferencia, pero más costosas de desplegar, especialmente si se requiere de una nueva infraestructura [14]. A continuación, se presenta una descripción general de las tecnologías más relevantes para implementar la infraestructura de comunicaciones de los sistemas AMI.

PLC

Las comunicaciones por línea de potencia (PLC, Power Line Communications) es una tecnología que utiliza la infraestructura de la red eléctrica como red de comunicaciones. Esto se convierte en la mayor ventaja de esta tecnología, pues no requiere la inversión de nuevos cables para la comunicación. Mejora la rentabilidad de las líneas rurales, puesto que hace posible trabajar en zonas remotas o a distancias más grandes.

Las principales desventajas de esta tecnología son los errores de transmisión debidos a interferencias electromagnéticas en la red, además de que requiere de un concentrador de datos en cada transformador de media a baja tensión, debido a que la información no atraviesa este dispositivo. La velocidad de transmisión y el ancho de banda son muy bajos. Es ideal para redes HAN y NAN [13].

RS-485

Es un estándar de comunicación serial, usado como sistema de interconexión entre dispositivos a grandes distancias que funciona en ambientes eléctricamente ruidosos sin problema alguno.

Algunas ventajas del estándar son que soporta hasta mil metros de distancia entre un dispositivo maestro y los esclavos, y que posibilita conectar más dispositivos a la misma red, es decir, se puede conectar a los dos hilos del RS-485 una gran cantidad de dispositivos reduciendo los costos de cableado. Su desventaja es que el ancho de banda que soporta es bajo. Es ideal para redes HAN y NAN [15].

ZigBee

Está diseñado para aplicaciones de bajo costo y bajo consumo, y ofrece una red inalámbrica fiable que permite la creación de redes utilizando múltiples topologías, como estrella, árbol y malla. ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y se utiliza para tasas de transferencia bajas, ideales para aplicaciones de utilidad dentro de una HAN [16].

Red celular

A pesar de que las redes celulares fueron diseñadas con otro objetivo como es la comunicación de voz y enlace de datos, han encontrado aplicación en las redes AMI, especialmente en sistemas SCADA para subestaciones y monitoreo de dispositivos remotos gracias a la gran cobertura que ofrece.

La ventaja de esta tecnología es que ya cuenta con la infraestructura, por lo cual no requiere de instalaciones adicionales. Una limitación importante de la tecnología celular es que la comunicación de datos no es priorizada en caso de eventos especiales y falta de cobertura en algunas regiones. Es ideal para aplicaciones WAN [15, 20].

Ethernet

Es una tecnología con muchas ventajas, incluyendo versatilidad, seguridad, velocidad y compatibilidad, que la convierten en una buena opción para ser utilizada en múltiples aplicaciones en las redes AMI, como la automatización de subestaciones de distribución y sistemas de protección [18]. El costo de la implementación y el mantenimiento puede reducirse significativamente con el uso de tecnologías basadas en el protocolo de internet (IP, Internet Protocol). Es ideal para uso en redes NAN [19].

Wi-fi

Es una tecnología diseñada para ser utilizada tanto en el hogar, la empresa y la industria, como en

redes AMI. “Wi-fi” se usa comúnmente como la abreviatura del estándar 802.11b, el cual permite que varios usuarios ocupen la misma banda de frecuencias con la mínima interferencia entre ellos. Es más beneficioso implementar una red de área local (LAN, Local Area Network) inalámbrica que cableada porque es más fácil de instalar, por su costo-eficiencia y porque proporciona movilidad de los dispositivos.

Puede ser utilizada en múltiples aplicaciones en las redes AMI, como la automatización de subestaciones de distribución y sistema de protección. Por otra parte, esta tecnología presenta algunas limitaciones debido a interferencias, ya que se ve afectada por las radiaciones electromagnéticas. Es ideal para aplicaciones en redes NAN [23, 16].

WiMax

La Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMax, Worldwide Interoperability for Microwave Access) es una tecnología inalámbrica que proporciona conexiones de banda ancha de alto rendimiento a largas distancias. Se puede configurar para conexiones punto a punto o punto-multipunto y proporcionar servicios de datos principalmente basados en Ethernet/IP. En redes AMI, se puede utilizar para la comunicación entre subestaciones o microrredes y como *backbone*. Es ideal para redes WAN [1].

Fibra óptica

Esta tecnología se puede utilizar para implementar redes WAN. Generalmente, se usa para interconectar subestaciones con el centro de gestión. Las fibras ópticas proporcionan una capacidad de transmisión muy alta de 10 Gbps utilizando una sola longitud de onda y de 40 Gbps a 1.600 Gbps utilizando la multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Además, ofrecen alto rendimiento y alta confiabilidad [1].

Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicación es un conjunto de pautas que posibilitan que distintos elementos que forman parte de un sistema establezcan comunicaciones entre sí, intercambiando información. Los protocolos de comunicación instituyen los parámetros que determinan cuál es la semántica y

cuál es la sintaxis que deben emplearse en el proceso de comunicación [20]. Para redes AMI, existen dos tipos de protocolos: los propietarios y los abiertos. Los protocolos propietarios permiten la comunicación de dispositivos y procesos de gestión únicamente con aplicaciones del fabricante. Por otra parte, los protocolos abiertos especifican de manera precisa cómo obtener la información desde la memoria del dispositivo. Lo anterior permite la implementación de un sistema de gestión que integre diferentes tipos de dispositivos y de diversos fabricantes. Algunos de los protocolos abiertos más importantes en la implementación de redes AMI se describen a continuación.

Modbus TCP

El protocolo Modbus fue desarrollado para sistemas de automatización industrial y controladores programables. Modbus se encuentra en la capa de aplicación del modelo OSI y se utiliza para las comunicaciones entre clientes y servidores. Los mensajes en Modbus generalmente son consultas y respuestas de dispositivos individuales, pero podrían ser una transmisión simultánea a todos los dispositivos del sistema que solicitan una acción específica. Los enlaces de comunicación física pueden ser cables o inalámbricos. Modbus puede transmitirse a través de diferentes enlaces físicos como RS-232, RS485 y Ethernet (TCP / IP) [21].

DNP3 TCP

DNP3 es actualmente el protocolo Maestro/Esclavo dominante en los sistemas SCADA de utilidad eléctrica. Los mensajes DNP3 no están restringidos a la transferencia de un punto de datos como Modbus. Se pueden encapsular múltiples tipos de datos (es decir, booleano, punto flotante) en un solo mensaje para reducir el tráfico de datos. Las marcas de tiempo y la información de calidad de datos también se pueden incluir en el mensaje. A diferencia de Modbus, los dispositivos esclavos DNP3 pueden enviar actualizaciones a medida que cambian los valores, sin tener que esperar una encuesta del Maestro [16].

IEC 61850

IEC 61850 es un estándar que define modelos de datos, intercambios y eventos entre subestaciones

de sistemas de potencia. Este estándar se puede asignar a una serie de protocolos heredados, como la especificación de mensajes del fabricante (MMS), los eventos genéricos de subestaciones orientadas a objetos (GOOSE) y los valores medidos muestreados (SMV). IEC 61850 fue diseñado para ejecutarse a través de redes Ethernet.

Esto debería tener un impacto positivo en el costo y el funcionamiento de los componentes del sistema de potencia en la capa de aplicación y en la capa superior. El inconveniente que surge es que los dispositivos que actualmente soportan este protocolo están destinados a funciones en subestaciones eléctricas, por lo que su costo es muy elevado y esto los hace poco atractivos para aplicaciones AMI [17].

Métricas de rendimiento

El éxito o el fracaso de una microrred se basan en un buen sistema de comunicaciones. Para realizar una infraestructura de comunicaciones práctica en redes inteligentes, es necesario contar con calidad de servicio (QoS) que garantice que las tecnologías utilizadas cubran con las necesidades de la red [5]. Se deben considerar ciertas métricas de rendimiento; las más importantes se describen a continuación.

Latencia o retardo

Es la cantidad de tiempo que toma para que los datos viajen, ya sea en un solo sentido o de ida y vuelta, a través de la red de comunicaciones. Un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red. Otros factores que influyen en la latencia de una red pueden ser el tamaño de los paquetes transmitidos y el tamaño de los *buffers* dentro de los equipos de conectividad.

Una red AMI se caracteriza por el hecho de que la mayoría de las interacciones deben tener lugar en tiempo real, por lo cual los mensajes deben transmitirse dentro de un marco de tiempo muy corto. Los tiempos permitidos para señales de protección están en el rango de 3-16 ms y para monitoreo en tiempo real están en el rango de 16-100 ms [19].

Ancho de banda

Es la velocidad de datos, medida en bits por segundo (bps). Para asegurar la utilización de la solución en redes AMI, las alternativas que se propongan deben tener un ancho de banda lo más grande posible sin que ello implique costos exagerados. Se estima una transferencia de datos de 2-5 Mb/s como guía para enlaces AMI para permitir la transmisión de mediciones de voltaje y corriente trifásicas, ángulo de fase y datos de medición [22].

Throughput (rendimiento)

Es la tasa de bits neta a la que los datos son transferidos con éxito a través de un enlace de comunicaciones en un determinado periodo de tiempo. Este dato puede ser entregado sobre un enlace físico o lógico, o a través de un cierto nodo de la red. Por regla general, el *throughput* es medido en bits por segundo (bit/s o bps) y a veces, en paquetes de datos por segundo. Aunque el requerimiento de tasa de transmisión aumenta con el despliegue de nuevas aplicaciones, para un sistema SCADA usualmente no excede los 100 Kbit/s.

Pérdida de paquetes

Es una métrica importante, ya que permite identificar las condiciones de la red. Cuando los paquetes se transmiten desde la fuente al destino, primero se almacenan en *buffers*. Un paquete se considera perdido debido a la imposibilidad de entregarlos a un receptor que tiene un *buffer* lleno, lo cual puede obligar a la retransmisión de los paquetes perdidos. Las alternativas deben tener una pérdida mínima debido a que se trata de información que puede resultar crítica para la operación segura de la microrred. Una pérdida aceptable es 10^{-3} (implica que máximo un paquete de datos puede contener errores de cada mil paquetes).

Disponibilidad

Es el porcentaje de tiempo en que un dispositivo específico de la red está en funcionamiento y disponible para su uso. En otras palabras, la disponibilidad hace referencia a la probabilidad de que

un servicio funcione adecuadamente en cualquier momento.

Resultados

Propuesta de diseño

En esta primera fase, es necesario conocer los puntos que se desean monitorear, con el fin de analizar y seleccionar las tecnologías más adecuadas. Para ello, se considera que el objetivo del sistema AMI es permitir la observabilidad de la red eléctrica de la universidad. Una red se dice que es observable si se puede obtener de ella un número suficiente de medidas que permitan determinar los estados del sistema [23].

Para lograr una observabilidad completa de la red eléctrica, lo ideal es la instalación de equipos de medida en cada uno de los nodos del sistema. Este procedimiento, aunque válido, es probablemente inviable, pues se incurre en excesivos costos de infraestructura y equipos [7]. Considerando que el número de subestaciones que existen en el campus es relativamente pequeño, para que la red eléctrica sea totalmente observable, la mejor opción es realizar una medición directa en cada una de las once subestaciones. La ubicación de los once medidores se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación de medidores

Subestación	Ubicación
1	Laboratorios de Ingeniería
2	Laboratorios especializados
3	Planta eléctrica
4	Bloque tecnológico
5	Biblioteca
6	Bloque 2
7	Administración
8	Facultad de Artes
9	Coliseo
10	Laboratorios de docencia
11	VIPRI

Fuente: elaboración propia

En la figura 3, se observa el campus universitario; se señala en rojo la ubicación de las subestaciones y la distancia al centro de gestión (marcado en

color verde). La ubicación del centro de gestión se debe a que en ese edificio se encuentra el laboratorio de microrredes del Departamento de Electrónica y, además, porque es un punto central que permite una comunicación equitativa con todos los puntos de medida.

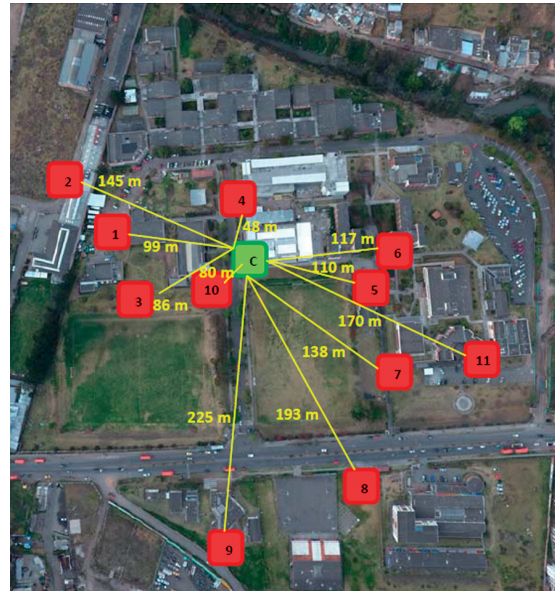


Figura 3. Ubicación de los medidores dentro del campus universitario

Fuente: elaboración propia

En la figura 3, también se observa que la distancia de siete subestaciones al centro de gestión supera los cien metros. Con base en lo anterior, se analiza la implementación de la red de comunicaciones con diferentes tecnologías:

1. **Ethernet:** para esta tecnología, la longitud máxima permitida es de cien metros, por lo tanto no es una buena opción para esta aplicación.
2. **PLC:** los medidores inteligentes realizan las mediciones del lado de baja tensión en cada subestación. Cuando esta tecnología se utiliza para la conexión de dispositivos en la red de baja tensión, el concentrador de la información también se debe encontrar en baja, no es posible que la información se transporte por medio del transformador. Esta característica hace que PLC no sea aplicable en esta aplicación.

3. **Fibra óptica:** como se mencionó, esta tecnología se utiliza para implementar redes WAN. Además, proporciona una capacidad de transmisión de hasta 10 Gbps, por lo cual un sistema de comunicación con esta tecnología estaría sobredimensionado.
4. **RS-485:** esta tecnología es una buena opción, dado que permite comunicación a distancias de hasta 1.200 metros. La desventaja de esta tecnología y de todas la cableadas es que necesitan de una infraestructura para su instalación que muchas veces superan el costo de la misma tecnología.

La subestación 10 se encuentra en el interior del edificio donde también se ubica el centro de gestión. En este caso, la tecnología seleccionada es Ethernet por su versatilidad, seguridad, velocidad y compatibilidad. Para las otras diez subestaciones, teniendo en cuenta las distancias, la mejor opción es utilizar una tecnología inalámbrica, que reduce el tiempo y los costos de instalación.

Medidores inteligentes

Estos dispositivos son los encargados de medir variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y frecuencia, entre otras. Para su elección, se deben analizar algunas características como precisión, variables eléctricas medibles, rangos de medición, puertos y protocolos de comunicación que soporta. Después de realizar una evaluación de las especificaciones de los medidores existentes en el mercado, se eligió el medidor Satec EM133 por sus múltiples ventajas, por ejemplo: precisión de 0,5S, trifásico y soporta los protocolos Modbus/TCP y DNP3/TCP, lo cual permite efectuar diferentes pruebas de rendimiento. Una característica importante es que dispone de una salida digital (sin módulo adicional) que permite realizar control de carga. Para las medidas de corriente, se utilizaron transformadores de corriente de 400 A, que amplían el rango de medición con una resolución de 40 mA.

Sistema de comunicaciones

Teniendo en cuenta la ubicación de los medidores inteligentes, la topología seleccionada es estrella, en la que el punto de acceso central se comunica directamente con los nodos finales en su área de

cobertura. En este caso, en el nodo central se ubica el centro de gestión y en los nodos finales se ubican los medidores inteligentes.

La elección de esta topología se basó en ventajas como: mayor facilidad de implementación, mayor velocidad de comunicación entre los nodos finales y el central, y permite la expansión de la red de manera sencilla, simplemente adicionando nodos o convirtiéndose en una estrella extendida [24].

En la figura 4, se puede observar la red de comunicaciones propuesta y se detalla cada uno de los elementos que la conforman.

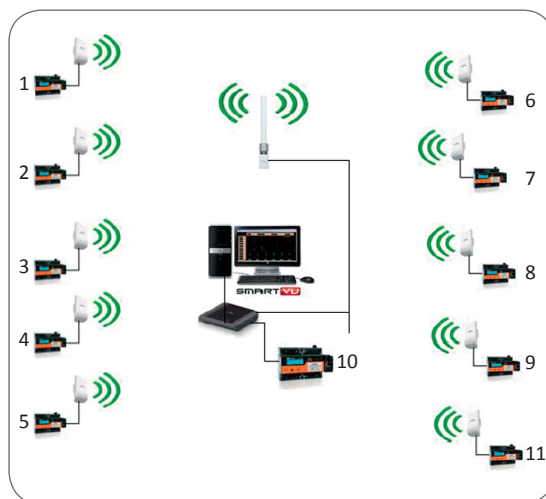


Figura 4. Red de comunicaciones en topología estrella

Fuente: elaboración propia

Los equipos seleccionados para la red de comunicaciones deben cumplir con ciertas características como: potencia de transmisión que permita cubrir el área del campus, ancho de banda suficiente para las necesidades de la red y que permita futuras ampliaciones de la red y conexión de más equipos. Los equipos seleccionados se describen a continuación:

1. En el nodo central, se utilizó un radio UbiqUTi Rocket M2 que trabaja en la banda de 2,4 GHz, tiene una potencia de transmisión de 630 mW y una velocidad de 150 Mbps. Está acoplado a una antena omnidireccional AMO-2G10 de 10 dBi de ganancia, cubriendo todo el campus universitario. Es un equipo de fácil configuración e

instalación y de bajo costo, que cumple con las necesidades de la red.

2. En los nodos terminales, se instalaron radios UbiqUiTi NanoStation Loco M2 que trabajan en la banda de 2,4 GHz. Se ha seleccionado este dispositivo por sus múltiples ventajas, como fácil instalación con alimentación POE, antena integrada de 8 dBi de ganancia, interfaz de red Ethernet (Cat. 5, RJ-45), potencia de transmisión de 23 dBm y bajo costo.
3. En el centro de gestión, es necesario un *switch* que permita la comunicación de los diferentes elementos con el equipo de monitoreo y control, para lo cual se utilizó un UbiqUiTi airRouter.

Centro de gestión

Para la gestión de los datos y la red de comunicaciones, es necesario un *software* robusto y confiable que brinde las herramientas necesarias para recolectar la información de los medidores inteligentes y su respectivo análisis, procesamiento y almacenamiento. Una buena opción es SmartVU de Survalent Technology, un *software* SCADA robusto enfocado en sistemas eléctricos. El *software* se compone de los siguientes aplicativos:

1. SCADA Explorer: se utiliza para la creación de la base de datos (SCADA Server), para establecer las líneas de comunicación y para configuración de los medidores a conectar.
2. SmartVU: en este aplicativo se realiza la interfaz con el usuario.

Algunas de las funciones que realiza el sistema SCADA se mencionan a continuación:

1. Entradas: las variables de entrada son voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia y potencias.
2. Alarmas: se gestionan alarmas mediante el monitoreo de valores y umbrales de voltaje y corriente.
3. *Trends*: recolecta datos para el monitoreo a lo largo del tiempo.
4. Reportes: genera reportes a partir de los datos enviados por los medidores, estos se generan periódicamente o de forma manual.
5. Visualización: permite la gestión de los datos monitoreados y realizar acciones de control.

Los elementos que componen el sistema SCADA se identifican a continuación:

1. Interfaz Hombre-Máquina (HMI, Human-Machine Interface): es el *software* encargado de interactuar con el operador del sistema; provee de información a través de gráficos, esquemas, pantallas y menús. Esta función la realiza SmartVU, que está instalado en un servidor HP Proliant ML110 Gen 9 que se encuentra en el laboratorio de redes inteligentes ubicado en el edificio de laboratorios de docencia. En la figura 5, se observa la interfaz gráfica del sistema SCADA.
2. Unidad Terminal Maestra (MTU, Master Terminal Unit): es la unidad central; presenta los datos al operador a través del *software* HMI, reúne la información de los diferentes dispositivos y transmite las señales de control. SCADA Explorer es el *software* encargado de esta función y que además está instalado en el mismo servidor que la HMI.
3. Unidad Terminal Remota (RTU, Remote Terminal Unit): corresponde al esclavo dentro de la arquitectura. Envía señales de control a los actuadores, recibe señales de los sensores, recolecta la información y transmite los datos. En este caso, se cuenta con once medidores inteligentes.

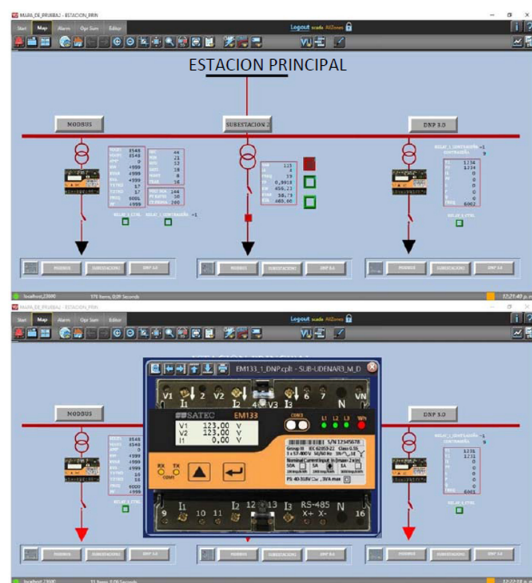


Figura 5. Interfaz gráfica SCADA

Fuente: elaboración propia

En la figura 6, se observan los datos almacenados en el sistema SCADA para los bloques de Administración y Biblioteca de la universidad. La información que se almacena es la de voltaje, corriente y factor de potencia para las tres fases, en intervalos de diez minutos. Los datos son procesados obteniendo información de la red eléctrica, en este caso, curvas de demanda que permiten la implementación de la gestión energética, programas de ahorro de energía y objetivos de las microrredes.

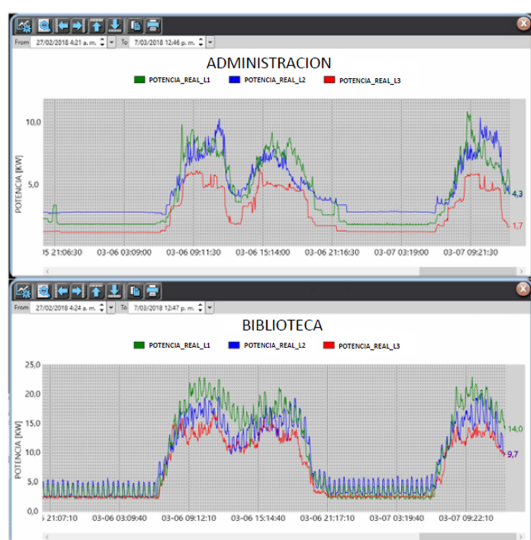


Figura 6. Curvas de demanda

Fuente: elaboración propia

Evaluación de desempeño

En esta sección, se describe el escenario utilizado para los experimentos y los resultados obtenidos.

Escenario de medida

La red de comunicaciones a evaluar soporta dos tecnologías: Ethernet y radioenlace. Cada dispositivo tiene asignada una dirección IP fija que permite identificarlo dentro de la red. Los parámetros a evaluar son: latencia, ancho de banda, *throughput* y pérdida de paquetes. Fping es una herramienta de prueba para redes, usada para medir latencia. Jperf es utilizado para medir el ancho de banda. Además, Throughput Test se utiliza como herramienta de medición de *throughput* y pérdida de paquetes.

En la tabla 2, se presentan los resultados de las diferentes pruebas realizadas en la red de comunicaciones. Primero, para las pruebas de latencia, se presentan los valores promedio para los enlaces de cada medidor inteligente, teniendo en cuenta las dos tecnologías implementadas. Para el medidor 10, se obtiene la latencia más baja, puesto que se comunica por tecnología cableada Ethernet.

En general, la latencia promedio para todos los medidores cumple con los requisitos de la red AMI para aplicaciones SCADA. Incluso, se podría utilizar para aplicaciones de protección, pues los rangos son de 3-16 ms, y cumpliendo a satisfacción con los requerimientos para monitoreo en tiempo real que son de 16-100 ms. Para el ancho de banda disponible en cada enlace, se observa claramente que estos valores sobrepasan sin inconveniente el valor mínimo recomendado (2-5 Mb/s) para aplicaciones AMI.

El *throughput* promedio medido en los enlaces para los once medidores supera sin dificultad los valores propuestos para sistemas SCADA, que se encuentra cerca de los 100 Kbit/s. El porcentaje de pérdida de paquetes para el enlace del medidor 10 por utilizar conexión cableada muestra el nivel más bajo de pérdida de paquetes con un porcentaje promedio de 0,0%. Mientras que los radioenlaces son la tecnología menos confiable; sin embargo, su valor se encuentra por debajo del 1%, valor aceptado para esta métrica.

Discusión

En este documento, se presenta el diseño de una infraestructura AMI para la microrred implementada en el campus de la Universidad de Nariño. La metodología propuesta permite abarcar los aspectos importantes para el diseño de este tipo de sistemas, por lo cual se puede aplicar a otros ambientes de microrred. En el diseño, se consideran los tres componentes principales de la AMI. Para la red de comunicaciones, es importante abordar aspectos como topologías y tecnologías de comunicación. Se evidenció que en ambientes exteriores una buena opción es la comunicación inalámbrica por su facilidad de implementación y, en muchos casos, menor costo.

En el nivel 3 de la AMI, que corresponde a los medidores inteligentes, es fundamental verificar que soporten protocolos de comunicación abiertos,

Tabla 2. Resultados de desempeño

Medidor	Latencia (ms)	Ancho de banda (Mb/s)	Throughput (Mbps)	Pérdida de paquetes (%)
1	9,6	95,1	86,5	0,25
2	6,8	94,8	86,7	0,26
3	8,7	94,8	86,4	0,22
4	5,7	94,8	86,5	0,29
5	3,3	94,0	86,6	0,26
6	4,0	94,8	86,5	0,24
7	4,8	95,5	86,8	0,25
8	8,9	94,0	86,5	0,29
9	4,3	95,5	86,3	0,23
10	1,6	94,9	90,1	0,0
11	3,6	94,6	86,2	0,21

Fuente: elaboración propia

puesto que permiten la integración del dispositivo con cualquier *software* gestor. En el centro de gestión, es indispensable contar con un *software* robusto que se ajuste a las necesidades de gestión de la microrred, como un *software* SCADA.

Para la evaluación de desempeño de la AMI, se tiene en cuenta la tecnología cableada Ethernet y radioenlaces, que se analiza y evalúa en función de varias métricas de rendimiento, como latencia, ancho de banda, *throughput* y pérdida de paquetes. Como es de esperarse, la tecnología cableada presenta mayor rendimiento que las tecnologías inalámbricas, lo cual la convierte en buena opción cuando se requiere mayor disponibilidad en la comunicación.

En función del costo-beneficio de los equipos de comunicación utilizados, se observa que los resultados son satisfactorios y que parámetros como el ancho de banda y la latencia superan de lejos los requerimientos mínimos para el óptimo funcionamiento de procesos de monitoreo y control dentro de la microrred. Como trabajo futuro, se plantea la evaluación de la AMI en procesos de protección, para lo cual —además del estudio de los canales de comunicación— es necesaria la evaluación de los protocolos dentro de la red de comunicaciones con el fin de verificar su funcionamiento y determinar si su desempeño se encuentra dentro de las exigencias para estas funciones.

Conclusiones

1. La topología en estrella es una buena alternativa para ser implementada en una AMI, dada su implementación sencilla, su mayor velocidad de comunicación y su menor necesidad de *hardware* para su implementación como concentradores o repetidores.
2. Para la elección de las tecnologías a utilizar en la red de comunicaciones, es importante estudiar el entorno donde será implementada, con el fin de determinar cuál tecnología es la que más se adapta a dicho entorno. Generalmente, una sola tecnología no cubre las necesidades de toda la red, por lo que se hace necesario una implementación híbrida.
3. Utilizar tecnologías inalámbricas puede reducir considerablemente el costo y el tiempo de implementación respecto a las tecnologías cableadas, además de que requieren menor infraestructura.
4. En la elección de los dispositivos a conectar en la microrred, como medidores inteligentes, es importante considerar que dispongan de protocolos abiertos como DNP3.0/TCP o Modbus/TCP, pues facilitan su integración con aplicaciones distintas a las del fabricante.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca, Departamento de Telecomunicaciones, Grupo de Investigación Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones-GNTT; y a la Universidad de Nariño, Departamento de Electrónica, Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Electrónica-GIIEE, por el soporte para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] J. García, “Recent progress in the implementation of AMI projects: Standards and communications technologies”, en *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, Praga, República Checa, 2015.
- [2] Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, “Study of security attributes of Smart Grid systems: Current cyber security issues”. *Current Cyber Security Issues*, marzo 2009 [En línea]. Disponible en: https://www.smartgrid.gov/files/Study_Security_Attributes_Smart_Grid_Systems_Current_Cyber_200903.pdf
- [3] O. Vondrous, P. Macejko, T. Hegr y Z. Kocur, “Testing Methodology for Performance Evaluation of Communication Systems for Smart Grid”, en *2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, Praga, República Checa, 2016.
- [4] A. Cataliotti, V. Cosentino, D. Di Cara, S. Guaiana, N. Panzavecchia, G. Tinè, D. Gallo, C. Landi, M. Landi, M. Luiso, “Experimental Evaluation of an Hybrid Communication System Architecture for Smart Grid Applications”, en *IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, Alemania, 2015.
- [5] N. N. Quang Do, H. See Ong, L. Chee Lai, Y. Xuen Che, X. Jui Ong, “Open-Source Testing Tools for Smart Grid Communication Network”, en *IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, Kuching, Malasia, 2013.
- [6] Y.-H. Jeon, “QoS Requirements for the Smart Grid Communications System”, *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 11, no. 3, marzo 2011, pp. 86-94 [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/7df4/701adfc503e4e95c3e0420dcd696f132fe.pdf>
- [7] D. L. Álvarez, J. F. Reyes, W. Montaña y E. E. Parra, “Sistema de Gestión de Energía en tiempo real del campus de la Universidad Nacional de Colombia”, *Mundo Eléctrico*, vol. 101, pp. 48-57, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/10/48-57-WEB.pdf>
- [8] A. Pantoja, K. Guerrero y D. Fajardo, *Análisis de oportunidades energéticas con fuentes alternativas en el departamento de Nariño*. Pasto: Universidad de Nariño, 2015 [En línea]. Disponible en: <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/docs/DocumentosProyectos/ProyectosPERS/ResumenesProyectosPDF/AnalisisOportunidadesEnergeticasNarino.pdf>
- [9] H. Sui, H. Wang, M.-S. Lu y W.-J. Lee, “An AMI System for the Deregulated Electricity Markets”, *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 45, no. 6, pp. 2104-2108, noviembre-diciembre 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2031848.
- [10] Y. Z. Luhua, “Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on Relations of Power Supply and Application on Smart Grid”, en *CICED 2010 Proceedings*, Nanjing, China, 2011 [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5736035/>
- [11] T. Hartmann, F. Fouquet, J. Klein. Y. Le Traon, A. Pelov, L. Toutain, T. Ropitault, “Generating Realistic Smart Grid Communication Topologies Based on Real-Data”, en *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Venecia, Italia, 2015.
- [12] H. Farooq y L. T. Jung, “Choices Available for Implementing Smart Grid Communication Network”, en *International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*, Kuala Lumpur, Malasia, 2014.
- [13] J. Zheng y D. W. Gao, “Smart Meters in Smart Grid: An Overview”, en *IEEE Conference Green Technologies*, Denver, Estados Unidos, 2013.
- [14] M. A. Hammoudeh, “Comparative analysis of communication architectures and technologies for smart grid distribution network”, Tesis de maestría, Universidad de Denver, Colorado, Estados Unidos, 2012 [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/a465fb009e2e038fc5e595dff64edf59/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [15] “Modbus parte II: comunicación a través de una red rs-485”, 2012 [En línea]. Disponible en: <http://tec-digitaldelbajo.com/blog/25-modbus-parte-ii-omunicacion-a-traves-de-una-red-rs-485.html>
- [16] M. A. Gao, “A Review of Voltage Control in Smart Grid and Smart Metering Technologies in Distribution Networks”, en *46th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Soest, Germany, 2011 [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6125583/>

- [17] C. M. Poveda, C. Medina y M. Zambrano, “Tecnologías de comunicación para redes de potencia inteligentes de media y alta tensión”, *Prisma Tecnológico*, vol. 5, no. 1, pp. 29-32, 2014 [En línea]. Disponible en: <http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/520/515>
- [18] Nuclear Regulatory Commission (NRC), “U.S. NRC - Nuclear Regulatory Commission” [En línea]. Disponible en: <http://www.nrc.gov/>
- [19] A. Aggarwal, S. Kunta y P. K. Verma, “A Proposed Communications Infrastructure for the Smart Grid”, en *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Gaithersburg, Suecia, 2010.
- [20] J. Pérez y A. Gardey, “Definición de protocolo de comunicación”, s. f. [En línea]. Disponible en: <http://definicion.de/protocolo-de-comunicacion/>
- [21] Tecnología Digital del Bajío, “Modbus”, 2012 [En línea]. Disponible en: <http://tecdigitaldelbajio.com/blog/25-modbus-parte-ii-comunicacion-a-traves-de-una-red-rs-485.html>
- [22] V. K. Sood, D. Fischer, J. M. Eklund y T. Brown, “Developing a Communication Infrastructure for the Smart Grid”, en *IEEE Electrical Power Energy Conference*, Montreal, Canadá, 2009.
- [23] B. Gou, “Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement”, en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, agosto 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.926475
- [24] J. Silva, “Understanding Wireless Topologies for Smart Grid Applications”, en *Grid-Interop Forum*, Phoenix, Estados Unidos, 2011 [En línea]. Disponible en: https://www.gridwiseac.org/pdfs/forum_papers11/silva_paper_gi11.pdf