

RESOURCE MINIMIZATION STUDY FOR A SMART METERING INFRASTRUCTURE POWER ENERGY

ESTUDIO DE MINIMIZACIÓN DE RECURSOS PARA UNA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Lenin Merino Villegas¹ Esteban Mauricio Inga Ortega¹

¹Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Quito, Ecuador

E-mail: lenin.merino.rv@gmail.com

E-mail: einga@ups.edu.ec

RESUMEN

Una de las necesidades a nivel mundial de los sistemas eléctricos en diferentes países, principalmente en países en vías de desarrollo, es el contar con una infraestructura de medición avanzada que permita controlar y transmitir información de manera bidireccional entre un medidor inteligente y su centro de control, de este modo se tendría beneficios para todos los actores del sistema eléctrico. En este contexto, las incorporaciones de estos sistemas traen grandes desafíos y retos a todo nivel, pues se requiere de estudios que permitan realizar la selección adecuada de tecnología y de técnicas de despliegue que den como resultado el mejor costo beneficio para el país o región asegurando un nivel de alta calidad, seguridad y fiabilidad. El presente estudio se realiza mediante una revisión bibliográfica en bases de reconocimiento científico a nivel mundial, a partir de lo cual se ha identificado varios aspectos claves para la actualidad de las infraestructuras de medición como son: cifras existentes, tendencias tecnológicas y tendencias de optimización de recursos utilizadas para este fin. Se establecen también varios criterios asociados a la planificación de despliegue de sistemas de medición inteligente para establecer una heurística que permita optimizar costos.

Palabras clave—Infraestructura de medición avanzada; Medición inteligente; Optimización.

ABSTRACT

One of the worldwide needs of electrical systems in different countries, mainly in developing countries, is to have an advanced metering infrastructure that allows bi-directional control and transmission of information between a smart meter and its control center that brings benefits for the performers in the electrical system. The incorporation of these systems bring challenges at all levels, it requires studies that allows an adequate selection of technology and deployment techniques that offers the best cost-benefit for the country or the region, that ensures a high quality, safety and reliability level. The research is performed through a bibliographic review

In bases of scientific recognition worldwide, identifying several measurement infrastructure aspects like: existing parameters, technological trends and resource optimization used for this purpose. Several ideas related to deployment planning of smart measurement systems are also established to minimize costs.

Key Words—Advanced metering infrastructure, Smart metering, optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos instalados a nivel mundial evolucionan constantemente debido a que se encargan del suministro de uno de los recursos más utilizados en las actividades diarias a nivel personal, residencial e industrial, y a medida que los países se industrializan consumen cantidades de energía cada vez más grandes. Es así que la adopción de una infraestructura de medición avanzada inteligente de consumo energético a nivel residencial toma una alta relevancia, esto debido a las características que representa, como es el hecho de poseer una alta confiabilidad que va de la mano con capacidades adecuadas de interoperabilidad, además que garantiza rentabilidad a mediano y largo plazo brindando niveles adecuados de seguridad junto con un consumo mínimo de energía, presentando bajos costos de instalación y mantenimiento si se lo realiza con la tecnología más adecuada acorde a la realidad de la zona de estudio, dando como resultado un control y reducción de pérdidas técnicas y no técnicas en la red de distribución eléctrica.

A nivel mundial estudios realizados indican que la penetración de medidores inteligentes sería de aproximadamente un 50% para el 2025 (Donato, Carugati, and Strack 2017), siendo la Unión Europea la región que lidera esta incorporación con un plan de despliegue inicial para cumplir con el 80% de penetración para 2020 (Schleich, Faure, and Klobasa 2017). En cuanto a América Latina este es aún un tema pendiente, donde, resaltan países como México, Brasil y Colombia, en donde a la actualidad se han desarrollado los primeros planes piloto para incorporar determinadas infraestructuras de medición y a partir del análisis de los resultados obtenidos, realizar planes de expansión a mayor nivel.

Actualmente, tres tecnologías compiten por predominar la medición inteligente: comunicación

por línea eléctrica (PLC), telefonía móvil y radiofrecuencia (van de Kaa et al. 2019), sin embargo, antes de decidir incorporar una tecnología, se debe realizar un análisis técnico económico que permita obtener resultados positivos en cuanto a costo beneficio para cada actor (Alaqeel and Suryanarayanan 2019).

En este contexto, estudios previos se han enfocado en desarrollar técnicas que permitan minimizar los costos, entre estas técnicas se tiene el posicionamiento óptimo y enrutamiento de concentradores, considerando factores como interferencia y escalabilidad partiendo de una selección adecuada de tecnología, la cual puede ser homogénea o heterogénea (Inga-Ortega et al. 2016), en otros casos se utiliza agrupamiento para crear perfiles de usuarios en base a la demanda (Haben, Singleton, and Grindrod 2016), también se consideran para zonas remotas de difícil acceso donde no hay penetración de redes celulares el uso del espacio blanco de TV (Zaeri-Amirani, Afghah, and Zeadally 2018), sin embargo, requiere de un marco regulatorio del espectro cuidadosamente establecido.

Este documento aborda la temática referente a optimización de costos en la recolección de información de medidores inteligentes de energía eléctrica y el despliegue de una infraestructura de medición acorde a las características de comportamiento de los abonados, el costo de infraestructura que representa la introducción de estas tecnologías, las tendencias de tecnologías de comunicación para medición inteligente, técnicas de enrutamiento aplicadas para optimización del costo en cuanto al despliegue de este servicio y los beneficios obtenidos tras su implementación. El estudio llega a identificar varios aspectos claves como cifras actuales, tendencias en cuanto a tecnología utilizada para este fin, estimaciones futuras, métodos para optimización de costos en cuanto a recursos, y posibilidad de beneficios a obtener luego de la adopción de un sistema de

medición inteligente.

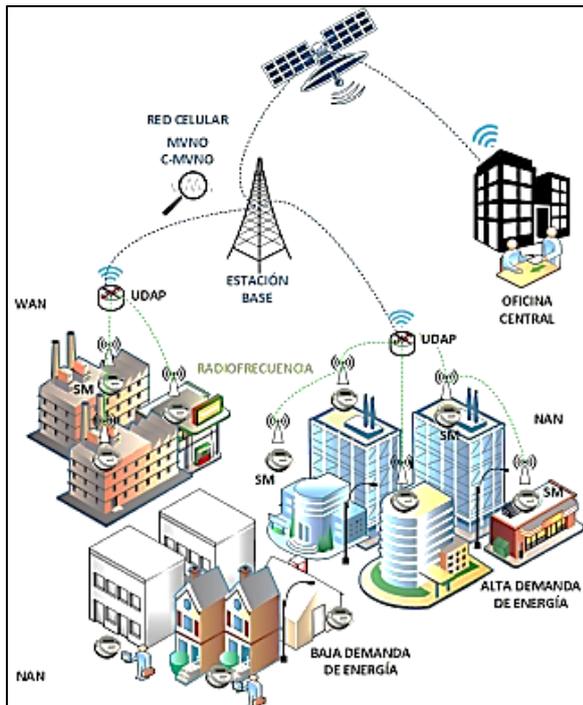


Figura 1: Arquitectura de una red de comunicación inalámbrica heterogénea.

1.1 PLANIFICACIÓN Y DESPLIEGUE

La planificación y el despliegue de una infraestructura de medición inteligente a gran escala requiere antes de resolver varios aspectos técnicos y tecnológicos que permiten maximizar los rendimientos económicos de todos los actores. La medición inteligente del estudio de energía eléctrica, considerando la agrupación de clientes según la demanda de energía y costo en los recursos de comunicación, es vital para conseguir un despliegue ideal de los recursos junto con la calidad y la seguridad en el servicio. Ya hay diferentes modelos que han analizado y que representan una base de referencia bastante robusta que debe adaptarse a la realidad de cada región, país o ciudad que requiere la solución de este problema mediante la aplicación de estos metodologías, sin embargo, los estudios se limitan a tratar un conjunto de determinados factores, dejando de lado otros tenidos en cuenta diferentes estudios, dando lugar a una variedad de soluciones generales, haciendo necesaria una propuesta

adaptada la realidad regional y nacional. Ante este problema, la asignación de canales para comunicar las estaciones base con las oficinas a través de operador móvil (MVNO) o que incorpore el concepto de radio cognitiva (C-MVNO), junto con la situación ideal de los puntos de agregación de datos con tecnología de comunicación heterogénea, uno para comunicar con los metros y otro con los puntos de agregación, además de los metros con capacidad multipunto, se convierte en un oportunidad clave, ya que los estudios prevén una perspectiva de éxito en términos de inversión económica para este tipo de escenarios, donde la demanda de electricidad de los usuarios se convierte en un factor importante a tener en cuenta en los estudios.

1.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE

La comunicación de datos bidireccional caracterizará a las redes inteligentes para compartir entre todos los usuarios relevantes de la cadena de conversión de energía, responsabilidades y beneficios. Un ejemplo de red abierta común para dispositivos de red inteligente es la infraestructura de medición avanzada (AMI), la cual es una arquitectura estándar para implementar una comunicación de datos a gran escala, los datos recopilados a través de un AMI pueden almacenarse, capturarse y enviarse a un sistema de acceso central, presentando ventajas frente a los primeros medidores de lectura automática (AMR), los cuales únicamente permiten recibir información debido a su capacidad unidireccional (Dileep 2020). Es así que una infraestructura de medición avanzada (AMI) debe tener en cuentas aspectos como bidireccionalidad de información, cobertura, escalabilidad y costo del espectro a ocupar (Inga et al. 2015), y están conformados por cuatro elementos básicos: medidor inteligente, concentrador de datos, red de comunicaciones cableada o inalámbrica directa o indirecta y sistema de gestión de la información (Téllez Gutiérrez, Rosero García, and Céspedes

Gandarillas 2018).

Tradicionalmente una AMI utilizaba un solo tipo de tecnología, sin embargo, existen infraestructuras heterogéneas, como las conformadas por dos tipos de redes: radiofrecuencia y celular, la primera para comunicaciones entre medidores inteligentes, y de medidores inteligentes a UDAPs, y la segunda para comunicar los UDAPs a las estaciones base (BS), permitiendo de esta manera aprovechar una infraestructura ya existente. En cuanto a confiabilidad y seguridad, la protección de datos por parte de la Unión Europea indica que los requisitos mínimos que se exige para un despliegue de medición inteligente son: Proporcionar comunicaciones de datos seguras y la prevención y detección de fraude (Claudio and Cheminet 2018).

1.3 PENETRACIÓN DE MEDIDORES INTELIGENTES

Las principales regiones a nivel mundial que a la actualidad han lanzado campañas masivas en cuanto a implementación de medidores inteligentes han sido América del Norte, La Unión europea y ciertos países Asiáticos.

En un panorama optimista se indica que para el 2025 existirá casi un 50% de penetración a nivel mundial, con alrededor de 85 millones de unidades, donde, América Latina llegaría al treinta y cinco por ciento (35%), mientras países desarrollados llegarían a un promedio alrededor del setenta por ciento (70%) (Donato et al. 2017).

En la Unión Europea a 2018, 34% del total de puntos de medición eléctrica en la Unión

Europea han sido equipados con un medidor inteligente representando 99'080 000 unidades, similar porcentaje de penetración al de América del Norte con 90'000 000 unidades, dando resultados costo beneficio con saldo positivo para 17 países de la Unión Europea, y contando con que 7 aún no disponen de resultados, donde, a partir de esta experiencia se ha estimado un promedio de inversión por medidor de 200.99 €, y un beneficio de 274.71 € (European Commision 2019). Otra

región a tener en cuenta es Asia Pacífico, que a pesar de que su nivel de penetración de medición inteligente es alrededor del 20%, hoy representa la región más grande en el mercado global de medidores inteligentes debido a su densidad poblacional.

La incorporación de medición inteligente de energía eléctrica a nivel de américa latina aún es un tema pendiente, ha quedado muy por debajo de Europa o Norte América, debido principalmente a la falta de adopción de políticas que aborden las barreras de adopción a gran escala (Zhou and Brown 2017), además del costo que representa el despliegue de los recursos necesarios. De acuerdo a Navigant Research, los países de la región han permanecido en modo "piloto" durante varios años, con un despliegue limitado de infraestructura de medición avanzada (AMI) y pocos planes inmediatos para intensificarlo (Claudio and Cheminet 2018). Este mercado está liderado por México y Brasil, pero incluso en México donde la penetración de medidores inteligentes es del 10%, no está claro si logrará alcanzar su objetivo de tener 30 millones de medidores inteligentes (79% de penetración) en 2025, en el caso de Ecuador únicamente hay planes piloto.

1.4 REDES DE COMUNICACIÓN

Existen principalmente tres áreas bien delimitadas de comunicación las cuales se encuentran cubiertas por sus respectivos protocolos, siendo de esta manera conocidas como: red de área del hogar (HAN), red de área de vecindario (NAN) y red de área extendida (WAN) (Ruiz Maldonado and Inga 2019).

La red del hogar permite comunicar la variedad de dispositivos que se utilizan dentro del hogar (luces, interruptores, televisores, etc.) mediante tecnologías como Wifi, Ethernet, PLC, Bluetooth. Mientras tanto NAN es el protocolo para la comunicación de la zona que abarca desde los medidores inteligentes a los sistemas de gestión de

datos, cuenta con concentradores que controlan y gestionan los medidores inteligentes a través de tecnologías como HSPA, LTE, WiMax entre otros. Finalmente, la red WAN es la encargada de transportar información hacia los centros de gestión de información de cada empresa eléctrica de distribución (Ekanayake and Liyanage 2012).

1.5 TENDENCIAS TECNOLÓGICAS

Existen varias opciones con sus ventajas y desventajas propias, ya sean cableadas o inalámbricas, entre estas se tiene: Power Line Communication PLC, la cual utiliza la red cableada de energía eléctrica preexistente para comunicarse, la misma presenta ciertas limitaciones sobre distancias muy largas. En cuanto a opciones inalámbricas el mercado presenta una variedad de alternativas como la red celular (GSM, GPRS, 3G, 4G, 5G), redes de baja potencia y largo alcance, WiMAX, etcétera. Actualmente, tres tecnologías compiten por predominar la medición inteligente: comunicación por línea eléctrica, telefonía móvil y radiofrecuencia. De acuerdo al estudio de revisión de energía renovable y sostenible de (van de Kaa et al. 2019), expertos consideran que la comunicación por línea eléctrica tiene una alta probabilidad de convertirse en la dominante, luego de evaluar aspectos como: supremacía operacional, superioridad tecnológica, compatibilidad, flexibilidad, estrategia de precios, tiempo de entrada, bases actuales instaladas, regulador y proveedores. En el contexto nacional, estudios indican que se puede minimizar la inversión en infraestructura utilizando una red híbrida formada por radiofrecuencia para comunicación entre medidores y concentradores, y vía celular para comunicación entre concentradores y centros de control.

A continuación, se muestra una tabla de los cuatro estándares de comunicación que ya han sido empleados por países de la Unión Europea en su infraestructura de medición inteligente, cabe mencionar que este continente lidera esta

adopción tecnológica (European Commision 2019).

Estándar de Comunicación	Francia	Alemania	Grecia	Hungría	Italia	Holanda	Polonia	Portugal	España	Reino Unido
PLC	•		•	•	•	•	•	•	•	
2G - GSM	•		•	•	•	•	•		•	•
2.5G - GPRS			•			•			•	
Wireless /wM-Bus		•					•			

Figura 2: Principales tecnologías empleadas por países de la Unión Europea para medición inteligente de energía eléctrica

1.6 TENDENCIAS DE OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS

Teniendo en cuenta que el costo de utilizar la red celular es el más alto de las tres tecnologías predominantes en la actualidad para medición inteligente, la optimización de recursos junto con una adecuada adopción tecnológica y nivel de penetración va a permitir obtener resultados positivos en cuanto a costo beneficio para cada actor. Con este fin, investigadores alrededor del mundo proponen utilizar algoritmos tradicionales, variaciones y heurísticas enfocadas en localización, agrupamiento, enrutamiento, frecuencia de acceso a la red, entre otros, para resolver este problema. A continuación, se indica un cuadro de tendencias referentes a la problemática aborda por diferentes autores.

COBERTURA	ESCALABILIDAD	CAPACIDAD	ENRUTAMIENTO	AGRUPAMIENTO	POSICIONAMIENTO ÓPTIMO	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	PLANIFICACIÓN	DESPLIEGUE	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	LATENCIA	TRÁFICO	INTERFERENCIA	PAQUETES PERDIDOS	RESULTADO MEDIANTE:
•	•	•	•	•	•	•								Modelo Heurístico OPDWHN-AMI
					•	•				•				K-means optimizado
•			•	•	•					•				Agropamiento basado en colocación de DAP
		•	•	•			•				•	•		Modelo determinístico basado en generación de columnas
			•								•	•		Método basado en generación de columnas
•	•	•	•	•	•	•	•	•					•	Prim modificado, Dijkstra.
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				Heurística
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				Heurística, (K-means, Dijkstra)
•	•	•	•		•	•			•					Árbol de Programación estocástica multifetapa
•	•	•	•	•	•	•	•	•						Algoritmo de ruta óptima
•		•	•	•							•			K-means, Greedy
•		•	•	•	•	•	•	•						MILP
•	•	•	•	•	•	•	•	•			•			Generación de columnas

Figura 3: Técnicas empleadas por países de la Unión Europea.

1.7 BENEFICIOS

Los sistemas de medición avanzada habilitan escenarios para nuevos mercados energéticos que redundan en beneficios para todos los actores del sistema eléctrico: En cuanto al usuario final, pasa a decidir activamente sobre su consumo y también como productor de energía en caso de aplicar, permitiéndole interactuar con otras tecnologías como Home Display para visualizar sus consumos y tomar decisiones óptimas frente a las señales de precio, se tiene estudios donde muestran que cuando el usuario cuenta con una retroalimentación han logrado reducir en un 5% su consumo eléctrico (Schleich et al. 2017).

Para los operadores de red representa una reducción de costos y recursos, además de, disponibilidad en tiempo real de información de la red de distribución, minimizando el tiempo de detección de fallas y monitoreo online de la calidad de la energía, permitiendo realizar predicciones de carga de corto plazo del sistema para garantizar continuidad del servicio. También se habilitan programas de gestión de la demanda; esto disminuye el nivel de cargabilidad de los

transformadores, mejora la regulación de tensión en las colas de los circuitos, disminuye la restricción de transmisión de energía y libera capacidad del sistema (Téllez Gutiérrez et al. 2018).

Para los comercializadores de energía, el nuevo proceso de facturación reduce los errores de lectura de medición y los recursos requeridos para su ejecución, además, puede implementar un sistema de tarifas que no tenga en cuenta solo la potencia eléctrica sino también la energía; esto representa ingresos por la energía consumida y por la contratada en el mercado minorista (Téllez Gutiérrez et al. 2018).

El aumento de la eficiencia energética del sistema eléctrico tiene impactos positivos en el medio ambiente al reducir emisiones de dióxido de carbono de plantas térmicas, además, promueve la necesidad de recurso humano capacitado, lo cual eleva el nivel educativo y tecnológico de la sociedad (Téllez Gutiérrez et al. 2018). El modelo de negocios llevado a cabo en Europa ha resultado ser positivo en la mayoría de sus países (Claudio and Cheminet 2018). En Arabia Saudita la adopción de una infraestructura de medición avanzada a resultado en un beneficio económico de \$12.51 billones a partir de una inversión de \$3.36 billones (Alaqeel and Suryanarayanan 2019).

Respecto a pérdidas no técnicas, se estiman en \$20 Billones a nivel mundial, cifras que pueden ser comparadas con capacidades de generación de países como Francia o Alemania, y estas se deben principalmente al uso clandestino del servicio, el cual puede darse a través de conexiones ilegales o mediante manipulación del medidor de energía, además de errores administrativos y técnicos. En este punto, al contar con una infraestructura de medición donde los datos prácticamente son provistos en tiempo real por los medidores inteligentes, permiten a las distribuidoras detectar fraude con la ayuda de análisis de datos. Tal es el caso de ENEL, empresa italiana donde se ha llegado a ahorrar 750 millones de euros por año gracias a

esta incorporación, y recuperó rápidamente la inversión de 33 millones realizada en solo cuatro años (Donato et al. 2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio utiliza una Heurística que parte la estratificación de un conjunto de 405 medidores inteligentes instalados, de los cuales la heurística escogerá los idóneos que puedan actuar como UDAPS, cumpliendo criterios de distancia de alcance de comunicación, capacidad y número de saltos, permitiendo minimizar la cantidad de UDAPS y por lo tanto la minimización de costos de comunicación, pues para la comunicación SM-SMY SM-UDAP se opta por Wifi con un alcance de 100m, mientras que para la comunicación UDAP-UDAP y UDAP-EB así como EB-Oficina se opta por la comunicación celular LTE con un alcance de 1000m. Para esto, se diseñó una metodología heurística que es presentada en la siguiente figura:

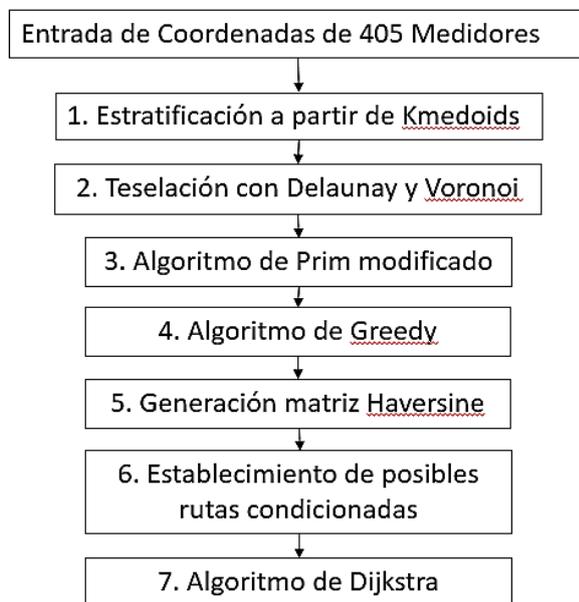


Figura 4: Técnicas heurística desarrollada

1. Kmedoids Agrupa a los 405 medidores inteligentes en nueve estratos correspondientes a nueve grupos distintos de consumo de energía eléctrica.

2. Delaunay y Voronoi triangula cada uno de los estratos del paso 1, con su método propio de interpolación simple y basado en distancia euclidiana permitiendo trazar las líneas de separación entre cada una de las distintas agrupaciones.
3. El algoritmo de PRIM modificado toma en cuenta la distancia máxima de comunicación entre cada par de medidores inteligentes, además de la capacidad y el número de saltos para entregar una matriz de conexión entre todos los puntos, donde cada medidor cumple las condiciones establecidas:
Distancia Máxima: 100 m
Capacidad: 5, 10 y 15
Número de Saltos: 3
4. Greedy aplica su estrategia de búsqueda para encontrar la opción óptima donde arroje los índices de los medidores inteligentes que van a actuar como puntos de acceso (UDAP) que permitan la conexión entre SM-UDAP.
5. Aplica el cálculo de distancia Haversine entre los puntos que pueden tener conexión y que cumplen con las condiciones de distancias y de transporte de información desde el medidor inteligente hasta la oficina, dejando de lado las conexiones que no cumplen las condiciones establecidas.
6. Se trata la información de la matriz obtenida en el punto 5, para dejar únicamente una matriz de rutas posibles cumpliendo las condiciones del punto 5 y aumentando la restricción de la cantidad de saltos.
7. El algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos, permite la determinación del camino más corto entre cada uno de los medidores y la oficina, permitiendo una conexión SM-UDAP-EB-OFICINA y que cumpla con las restricciones indicadas con anterioridad en los pasos previos cumpliendo de esta manera los criterios establecidos de distancias de alcance, capacidad y número de saltos, encontrando la mínima cantidad de UDAPS

con conexión celular, permitiendo así la optimización de costos.

indiferente o mínima cuando se tiene limitada la capacidad del UDAP de conectarse directamente con máximo 10 medidores.

3. RESULTADOS

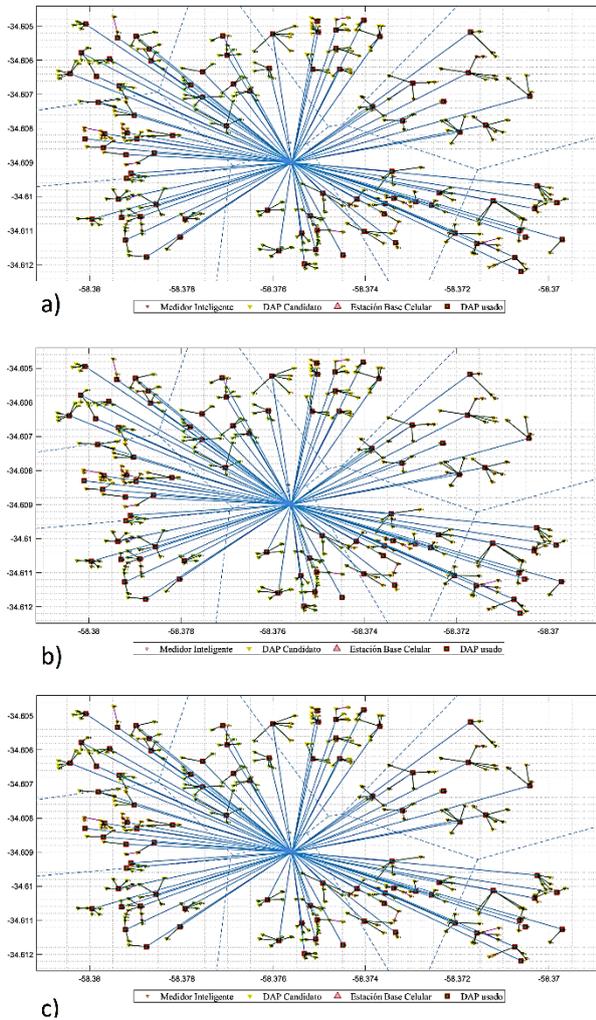


Figura 5: Árbol de comunicación generado desde Oficina a Medidores Inteligentes para una capacidad de 5 y saltos permitidos de a) 1, b) 2 y c) 3.

Como principal característica de la figura 5 se tiene el hecho que la cantidad de saltos es indiferente cuando se tiene limitada la capacidad del UDAP de conectarse directamente con máximo 5 medidores.

Como principal característica de la figura 6 se tiene el hecho que la cantidad de saltos también resulta

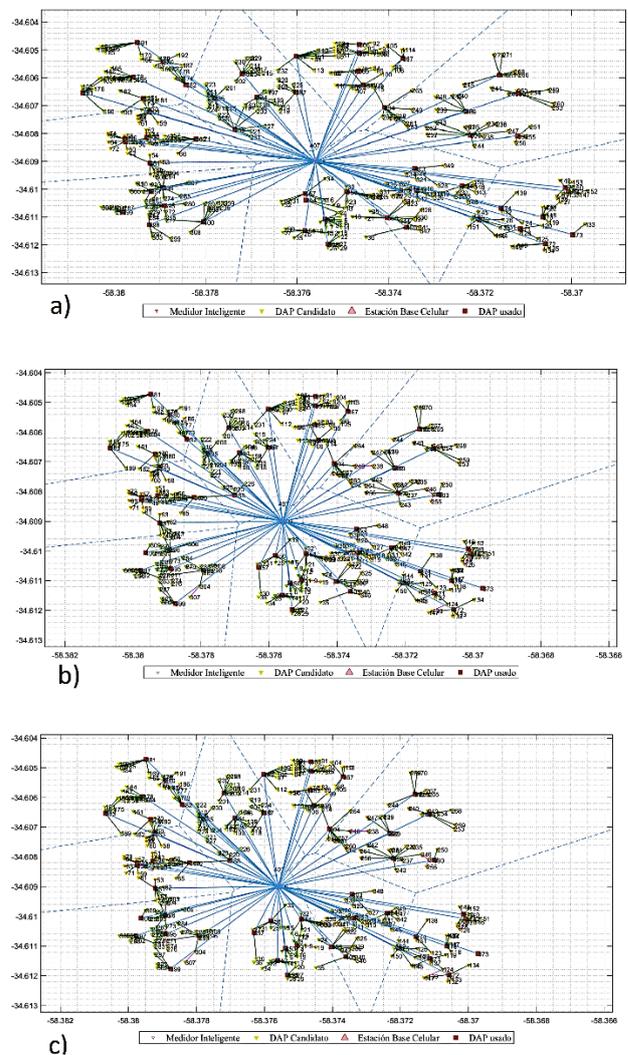


Figura 6: Árbol de comunicación generado desde Oficina a Medidores Inteligentes para una capacidad de 10 y saltos permitidos de a) 1, b) 2 y c) 3.

Como principal característica de la figura 7 se tiene el hecho que la cantidad de saltos empieza a notarse principalmente si se compara a) con b) y c) pues hay una diferencia de 5 UDAPS menos lo cual llevado a gran escala ayuda a minimizar el costo.

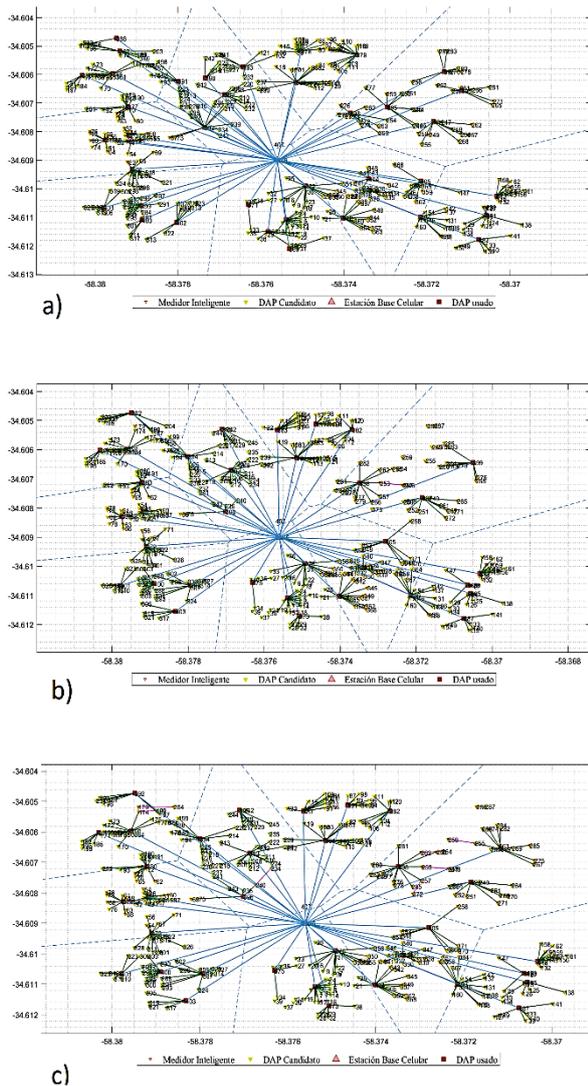


Figura 7: Árbol de comunicación generado desde Oficina a Medidores Inteligentes para una capacidad de 15 y saltos permitidos de a) 1, b) 2 y c) 3.

A partir de estos resultados se muestra la siguiente tabla:

Tabla 1
Cantidad de UDAPS requeridos en función de número de saltos y capacidad.

SALTOS	CAPACIDAD	UDAPS	SM
1	5	88	317
	10	55	350
	15	39	366
2	5	88	317
	10	56	349
	15	34	371
3	5	88	317
	10	56	349
	15	34	371

Al llevar la tabla a un gráfico lineal se puede

observar y comprobar la mínima inferencia de la cantidad de saltos para cada uno de los experimentos realizados.

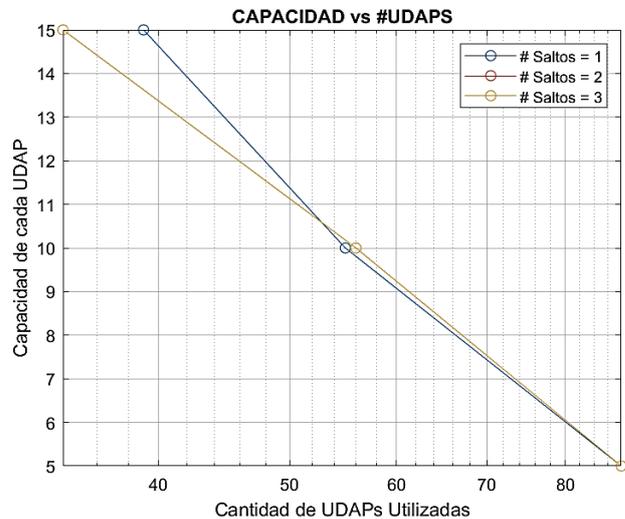


Figura 8: Cantidad de UDAPS requeridos para medición inteligente en función de la capacidad de cada UDAP, para variaciones de saltos de 1, 2 y 3.

4. DISCUSION

La cantidad de saltos para llevar información desde un medidor inteligente hasta la oficina central donde se procesa toda la información afecta mínimamente a los resultados obtenidos, no es una variable que debería consumir recursos computacionales en el análisis de futuros trabajos. Se comprueba que la capacidad de los concentradores, independientemente del número de saltos, es una variable que ayuda a minimizar la cantidad de UDAPS requeridas en cada caso, por lo cual el análisis de la tecnología más adecuada debe ir orientado hacia ese análisis.

Cuando la capacidad aumenta considerablemente se puede ver que empieza a afectar la cantidad de saltos, por lo cual realizar un estudio a mayor alcance sería el próximo paso.

Mediante la heurística desarrollada se comprueba que se obtiene un 100% de conexión pues no queda ningún medidor fuera del árbol de conexión desplegado.

5. CONCLUSIONES

Para obtener una comunicación inalámbrica del 100% de los abonados se debe optar por tecnologías multisaltos que permitan apoyar a cualquier punto que quede fuera del alcance de una comunicación directa.

La aplicación de tecnologías heterogéneas en el despliegue de una infraestructura de medición avanzada es vital pues permite optimizar costos, dejando los módulos que implican mayor gasto únicamente a los concentradores (UDAPS) los cuales serán los encargados de llevar la información a la estación base, la cual a su vez se comunica con la oficina central.

Para la comunicación entre medidores inteligentes y desde ellos hacia cada concentrador es importante balancear el alcance de conexión con su inversión, pues actualmente existen tecnologías de largo alcance que pueden ayudar a solventar este punto de mejor manera como es el caso de LoraWan.

Para futuros trabajos se puede comprobar el retorno de la inversión a través de un análisis en función de la demanda de diferentes agrupaciones de estratos, para verificar la factibilidad de implementación de esta tecnología en cada uno de ellos.

REFERENCIAS

Alaqeel, T. A., and S. Suryanarayanan. (2019). "A Comprehensive Cost-Benefit Analysis of the Penetration of Smart Grid Technologies in the Saudi Arabian Electricity Infrastructure." *Utilities Policy* 60(June):100933.

Alskaif, Tarek, Manel Guerrero Zapata, and Boris Bellalta. (2015). "Game Theory for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: Latest

Trends." *Journal of Network and Computer Applications* 54:33–61.

Claudio, Autor, and Marcelo Cheminet. (2018). "Energía Informacional – Smart Metering."

Dileep, G. (2020). "A Survey on Smart Grid Technologies and Applications." *Renewable Energy* 146:2589–2625.

Donato, Patricio G., Ignacio Carugati, and Jorge L. Strack. (2017). "Medidores Inteligentes En Argentina: Consideraciones Para Una Implementación Adecuada." *Ingeniería Eléctrica | Agosto (figura 1):56–62.*

Ekanayake, J., and K. Liyanage. (2012). *Smart Grid Technology and Applications*. Vol. 53.

European Commission. (2019). *Benchmarking Smart Metering Deployment in the EU-28.*

Haben, Stephen, Colin Singleton, and Peter Grindrod. (2016). "Analysis and Clustering of Residential Customers Energy Behavioral Demand Using Smart Meter Data." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7(1):136–44.

Inga-Ortega, Esteban, Arturo Peralta-Sevilla, Roberto Carlos Hincapié, Ferney Amaya, and Idelfonso Tafur Monroy. (2016). "Optimal Dimensioning of FiWi

Networks over Advanced Metering Infrastructure for the Smart Grid." (2015) *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015* 30–35.

Inga, Esteban, Roberto Hincapié, Carlos Suárez, and Germán Arévalo. 2015.

"Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure Using Cellular Networks." (2015) *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2015 - Conference Proceedings.*

Inga, J., E. Inga, C. Gómez, and R. Hincapié. (2016). "Evaluación de La Infraestructura de Medición y La Respuesta de La Demanda." *Revista Técnica "Energía"* 12(1).

van de Kaa, G., T. Fens, J. Rezaei, D. Kaynak, Z. Hatun, and A. Tsilimeni Archangelidi. (2019). "Realizing Smart Meter Connectivity: Analyzing the Competing Technologies Power Line Communication, Mobile Telephony, and Radio Frequency Using the Best Worst Method." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103(December 2018):320–27.

Schleich, Joachim, Corinne Faure, and Marian Klobasa. (2017). "Persistence of the Effects of Providing Feedback alongside Smart Metering Devices on Household Electricity Demand." *Energy Policy* 107(December 2016):225–33.

Téllez Gutiérrez, Sandra Milena, Javier Rosero García, and Renato Céspedes Gandarillas. (2018).

"Advanced Metering Infrastructure in Colombia: Benefits, Challenges and Opportunities." *Ingeniería y Desarrollo* 36(2):469–88.

Zaeri-Amirani, Mohammad, Fatemeh Afghah, and Sherali Zeadally. (2018). "A Hierarchical Spectrum Access Scheme for TV White Space Coexistence in Heterogeneous Networks." *IEEE Access* 6:78992–4.

Zhou, Shan, and Marilyn A. Brown. (2017). "Smart Meter Deployment in Europe: A Comparative Case Study on the Impacts of National Policy Schemes." *Journal of Cleaner Production* 144(2017):22–32.