

Evaluación de la Infraestructura de Medición y la Respuesta de la Demanda

J. Inga¹ E. Inga¹ C. Gómez² R. Hincapié²

¹ Universidad Politécnica Salesiana

E-mail: jinga@ups.edu.ec; einga@ups.edu.ec;

² Universidad Pontificia Bolivariana

E-mail: roberto.hincapie@upb.edu.co; crisrina.gomez@upb.edu.co

Resumen

El presente artículo presenta el análisis de la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica (AMI) y su relación con la respuesta de la demanda (DR). El trabajo propone algunas alternativas para el óptimo despliegue de la infraestructura de comunicaciones a partir de una solución heterogénea que articula la red celular contemplada desde un operador móvil virtual (MVNO) con una red multi-hop a partir de IEEE 802.15.4g, integrados en puntos de agregación de datos universal (UDAP). Estos concentradores que podrán lograr una interconexión con la radio base celular más cercana. Al contemplar que la información es recurrente y necesaria para realizar la proyección de la respuesta de la demanda (DR) con información recibida, es necesario entonces que el despliegue sea *óptimo* para lograr un adecuado mantenimiento de la red, además conseguir una escalabilidad de la infraestructura con el menor impacto económico.

Palabras clave— Redes Eléctricas Inteligentes; Infraestructura de Medición Avanzada; Respuesta de la Demanda; Costo; Red Celular, UDAP

Abstract

This article presents the analysis of the advanced metering infrastructure of electricity (AMI) and its relation to the demand response (DR). The paper proposes some alternatives for the optimal deployment of communications infrastructure from a heterogeneous solution that articulates the cellular network provided from a mobile virtual network operator (MVNO) with a multi-hop network based on IEEE 802.15.4g, integrated into aggregation points universal Data (UDAP), hubs that can achieve interconnection with cellular radio base nearest. Contemplating that the information is recurrent and necessary for the projection of demand response (DR) to information received, it is then necessary that the deployment is optimal for proper maintenance of the network and achieve scalability of the infrastructure with the lowest economic impact.

Index terms— Smart Grid; Advanced Metering Infrastructure; Demand Response; Cost; Cellular Network.

Recibido: 08-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-12-2015

Forma sugerida de citación: Inga J.; Inga E.; Gómez C.; Hincapié R. (2016). "Evaluación de la Infraestructura de Medición y la Respuesta de la Demanda". Revista Técnica "*energía*" No. 12, Pp. 262-269.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se plantea un despliegue óptimo de las redes inalámbricas a ser empleadas como vía de comunicación bidireccional para la infraestructura de medición avanzada (AMI). Este óptimo despliegue propone una red centralizada y al mismo tiempo aprovechar de múltiples saltos entre los diversos elementos que componen la red de comunicación de los medidores inteligentes. En este sentido, es necesario considerar que la arquitectura propuesta es similar a una red móvil celular pero con dificultades superiores en cuanto a [1] [2]:

- La escalabilidad debido a que cada UDAP deberá comunicarse con un gran número de medidores inteligentes como parte de una misma celda.
- Comunicación en tiempo real, que debido a las características de los datos que son parte de los reportes de consumo de energía, existe gran sensibilidad al retraso, incluso pudiendo desestabilizar el sistema de la red inteligente.
- La seguridad es parte imprescindible en el manejo de información ya que la integridad de este factor debe ser conocida solo por los usuarios de cada hogar [3].

Por tanto en busca de aprovechando de las características de comportamiento de los medidores inteligentes dentro de la red se permita aportar en el diseño, escalabilidad, seguridad y monitoreo de datos en tiempo real y su máximo rendimiento a través de la compresión de información. Este trabajo no muestra la aplicación de CS y un análisis profundo de las señales relacionadas a los medidores inteligentes.

Se propone el uso del estándar IEEE 802.15.4g diseñado para utilidades de la red comunicación de medición inteligente ya que ha sido la primera estandarización en las redes de comunicación para servicios públicos que implementen los conceptos de Smart Grid [4]. Esto podría ser una de las soluciones factibles y más rentables sabiendo que el estándar también permite mantener una solución íntegra de red y abordar la gestión de datos en la red área doméstica (HAN).

Este artículo propone también la simulación para el óptimo despliegue de la red multi-salto [5] [6][7] entre medidores inteligentes con los UDAP; así como, entre UDAP con las estaciones base celular (BS).

En la Fig. 1 se advierte las tres redes de la infraestructura de medición avanzada, red HAN, red de área vecindaria (NAN), red de área metropolitana MAN, incluyendo red celular con IEEE 802.15.4g.

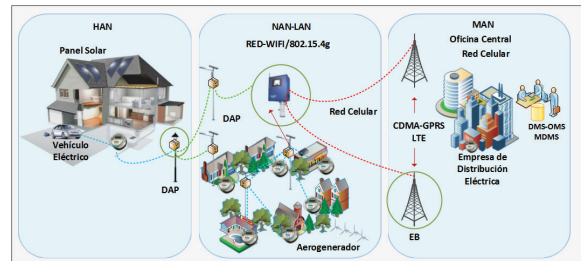


Figura 1: Arquitectura AMI usando Redes Inalámbricas

En adelante este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se introduce al despliegue de óptimo de comunicaciones inalámbricas para AMI. En la sección IV nosotros proponemos el modelo de optimización para el diseño de red propuesto, la sección IV desarrolla el análisis de resultados y finalmente nosotros concluimos este artículo en la sección V.

2. DESPLIEGUE ÓPTIMO DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA AMI

2.1. Dimensionamiento de la red de comunicaciones

La infraestructura de comunicaciones requerida para solventar las tareas específicas de AMI demanda de un óptimo despliegue de red y permitir la incorporación paulatina y exponencial de nuevos medidores inteligentes al sistema sin saturar los recursos. La propuesta incluye una red mixta de redes inalámbricas, la primera contempla la comunicación bidireccional desde un medidor inteligente hasta llegar al punto de agregación de datos UDAP [8][9][10] más cercano que generalmente deberá estar colocado en postes de alumbrado público de la red de distribución eléctrica, el segundo comprende la comunicación con la radio base celular más cercana que permita el intercambio y almacenamiento de información en los respectivos sistemas de gestión de datos medidos conocido como MDMS (Meter Data Management System) [11][12] los mismos que son controlados y gestionados desde las empresas de distribución eléctrica.

Es por tanto necesario establecer un modelo que permita un rápido despliegue de la red y que incorpore un sistema de información geo-

referenciado, que disponga además de la ubicación la información de capacidad, información referente a cobertura de cada UDAP, así como el número de medidores inteligentes con los que se encuentra enlazado. Así, cada UDAP pasa a ser considerado como centroide de un área definida según la capacidad de la radio del UDAP [13]. Entonces, para el dimensionamiento de la red es importante tomar aspectos relevantes como la ubicación del medidor inteligente dentro de la vivienda o edificación debido a que la cobertura de la señal de radio en sótanos dificulta un rápido despliegue y en ciertos casos se debe incorporar un UDAP adicional para recolectar la información de medición y poder realizar un multi-salto (multi-hop) entre UDAP o entre medidores inteligentes; este último detalle advierte la necesidad de incorporar en cada dispositivo al menos dos tipos de tecnologías, así tenemos que un medidor inteligente o UDAP puede tener tecnologías como IEEE 802.15.4g [14][9][15], WiFi o tecnologías relacionadas con los sistemas móviles celular, con lo que se facilita el despliegue y la cobertura de mayor número de usuarios, limitando la infraestructura al costo del equipo y tecnologías de comunicaciones.

Para nuestro trabajo se ha considerado en primera instancia un sistema geo-referenciado del barrio Laureles en la ciudad de Medellín – Colombia y donde se ha planteado una simulación y modelización para ubicar el UDAP de manera personalizada a discreción según se identifique el mayor número de abonados del sistema eléctrica, según la capacidad y cobertura de cada UDAP, para este caso, no se ha tomado en cuenta la clusterización de los abonados a cada UDAP que puede ser resuelto a través de algoritmos como k-means [16][17].

Otros estudios advierten la posibilidad de llevar la información de forma directa desde el medidor a la radio base celular que cubra dicha área, esto se lo ha propuesto ya en trabajos anteriores como se denota en [18][13][19]. El despliegue de la red de fibra óptica entre estaciones base se lo advierte en [20] como parte del aporte a Smart Grid [21][22] [23].

Con respecto al problema relacionado con la capacidad de canal se puede incorporar el concepto de radio cognitiva [24][25] sobre operadores móviles virtuales (Cognitive - Mobile Virtual Network Operator C-MVNO) que pueden estar a cargo de la red de comunicación de AMI, generando la posibilidad gestión de datos y de pago a través de la red celular manteniendo dos posibilidades; la

primera si existe un costo por arrendamiento total del espectro primario de un MVNO común [26], pero que garantice la lectura total de los dispositivos inteligentes y la segunda siendo la opción cognitiva con un C-MVNO que permita disponer de espectro en forma aleatoria debido a la oportunidad de encontrar huecos blancos (White Holes) [27] y que serían aprovechados en AMI, disminuyendo así el costo de arrendamiento total por uno parcial de uso según lo demandado, así se señala en [26] y [28].

2.2. Despliegue de AMI para una óptima respuesta de la demanda

Si partimos del concepto que la respuesta de la demanda donde se busca minimizar el consumo de aquellos usuarios a través de políticas de consumo colaborativo, donde reciben una compensación por aportar a la reducción de la demanda eléctrica, encontramos que es posible devolver la capacidad a la red con dicho estímulo, reduciendo así la carga de la red en horas pico y de esta manera aliviar la red en momentos de sobrecarga. Esto se ha comprobado que mejora aún más cuando el usuario tiene al alcance y en todo momento la información de su consumo energético [29].

Entonces si el cliente-consumidor puede aportar a este problema, es necesario que encuentre dicha información cercana y disponible en su hogar. Varios son los mecanismos que en un hogar inteligente (SH) colabora a las empresas de distribución a que el cliente optimice el consumo con acciones relevantes como: desconexión de iluminación; reducción de la demanda en los momentos que es más costosa o aumentar la carga en los momentos que es más económica.

Sin embargo, el consumo eléctrico del cliente residencial es una variable con incertidumbre y si a esto se suma demanda por climatización incrementa aún más el problema por no conocer en tiempo real el comportamiento de las cargas domésticas, incrementando el costo para cubrir la demanda puntual en un determinado rango de tiempo y considerar los costos operativos que esto representa, costos que son revertidos en los propios consumidores [29] [30].

Adicionalmente es posible entregar al usuario el valor característico de consumo de cada electrodoméstico, gestionado y monitoreado al interior del hogar desde hogar. Así, es posible determinar los puntos críticos que dan cuenta de un elevado consumo y en relación directa con su planilla. Entonces como dotar de estas

herramientas a la políticas de la respuesta de la demanda están en estrecha relación con AMI y su red de comunicaciones en HAN y NAN. De aquí la necesidad de dimensionar AMI de forma óptima para enlazar cada uno de los actores del sistema eléctrico y de forma particular al cliente con las empresas de distribución eléctrica.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para la formulación del problema se considera un conjunto de N concentradores (UDAP) S, donde S representa al conjunto de UDAP en el área de análisis., que se comunican entre sí para transportar información proveniente de AMI hacia la radio base b BS a través de una comunicación inalámbrica. Se dispone de sitios candidatos V donde se pueden emplazar a cada UDAP, los mismos que tiene una capacidad para receptor la información de hasta M medidores inteligentes. Por tanto, se pueden conformar clústeres de hasta M usuarios. Los usuarios de un clúster se conectan a una estación base celular siempre y cuando estén dentro del área de cobertura de dicha radio. Por otro lado el radio de cobertura de cada UDAP depende de la potencia consignada por la tecnología a ser utilizada y con la que podrá realizar un salto hasta el siguiente concentrador para agrupar a usuarios incluso lejanos.

En este sentido, se busca optimizar el costo de implementación de la red, a través de la optimización del número y de la ubicación de UDAP.

Para la formulación del problema de árbol de mínima expansión con UDAP se expresa de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i,j \in S} X_{i,j} g l_{i,j} \tag{1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i,j \in S} X_{i,j} = N - 1 \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i,j \in S \\ i \subset B \\ j \subset B}} X_{i,j} \geq 1, \quad \forall B \in V \tag{3}$$

$$X = \{0,1\} \tag{4}$$

Donde la ecuación (1) nos indica la función objetivo que minimiza el número de enlaces, según la distancia. La ecuación (2), la restricción

de enlaces, la ecuación (3) nos indica los nodos candidatos para que el enlace este activo y la ecuación (4) indica que si el enlace es activo =1, caso contrario es 0.

Algoritmo: Minimum Spanning Tree – UDAP + GIS

- Paso 1: Ubicar Sitios Candidatos Georeferenciados UDAP.
- Paso 2: Distancia entre UDAP – Método Harversine
- Paso 3: **Para todo:** $DAP_i, DAP_j \in S$
Si: $l_{ij} = \#$ enlace factibles, **haga** $l_{ij} \in G$
- Paso 4: MST: $2^N - 2$ # de árboles
Definición de subconjuntos:
Enlaces entrantes y enlaces salientes:
- Paso 5: Solución inicial:** $G_{ii} = G$
donde $G(dist \leq d_{min}) = 1$
Para: $d_{ij} \in S$, **haga:** MST mediante solución heurística (d_{ij}, G_i)
- Paso 6: **Si** existen rutas $\langle b_p, UDAP \rangle$, **ir a** Paso 4
Caso contrario terminar e **ir a** Paso 5

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Fig. 2 se presenta la ubicación de puntos de acceso de datos para agrupar a medidores inteligentes residenciales en una zona urbana y bajo geo-referenciación de sitios factibles de postes de alumbrado donde normalmente se colocan los UDAP. Se han ubicado para este modelo 70 UDAP los mismos que han sido colocadas según la demanda de abonados en una zona urbana.

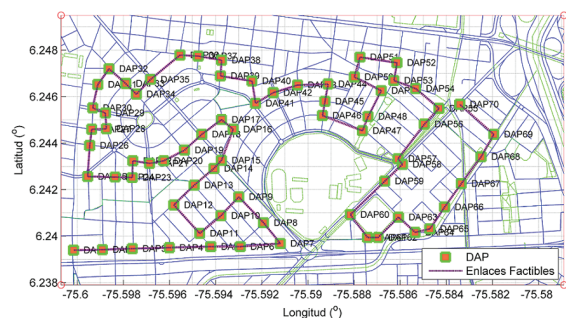


Figura 2: Sitios Candidatos – Multi-Hop para UDAP (Mapa osm - openstreetmap)

Con las ubicaciones respectivas de los posibles puntos candidatos, se procede a la ejecución del modelo de minimum spanning tree que minimiza el costo mediante la determinación de la distancia media más cercana entre cada UDAP. En este caso no se aplica la distancia euclidiana ya que no son puntos aleatorios, por lo que se calcula la distancia de puntos geo-referenciados según latitud y longitud de cada punto factible a través de la fórmula de Harversine.

En la Fig. 3 se presenta los resultados de la optimización del minimum spanning tree generado en el modelo planteado de 70 UDAP colocados en la grilla. Para facilidad de visualización de la gráfica se consideró una capacidad de radio base de hasta 10 medidores inteligentes. Se resaltan los enlaces óptimos para el envío del tráfico de información proveniente de la medición inteligente de energía eléctrica. Este resultado es útil para a su vez optimizar el costo de la implementación de la red al descartar los enlaces menos utilizados y la trayectoria más idónea requerida para un rápido despliegue de la red.

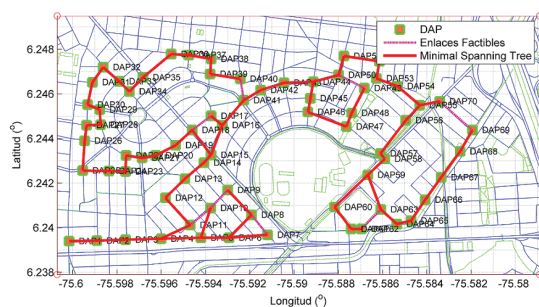


Figura 3: Minimum Spanning Tree Multi-Hop-UDAP

Una vez generado el mínimo árbol de expansión de la red de comunicación, se puede incluir otros algoritmos como el de agrupamiento basados en k-means para enlazar al UDAP más cercano, un número determinado de medidores inteligentes, así cada UDAP se convierte en un centroide de medidores inteligentes como se presenta en la figura 4. Para la simulación se agruparon 100 medidores repartidos en 4 cluster según su capacidad de cobertura y cada UDAP como parte del objetivo del trabajo determinado en el árbol de expansión mínimo (MST) y donde cada medidor puede ser la raíz de otra sub MST originado así desde cada hijo de cada UDAP. El modelo contempla la cobertura del 70% de UDAP en el MST propuesto. Por supuesto esto resultados se obtiene bajo un escenario simulado con un posicionamiento de usuarios aleatorio.

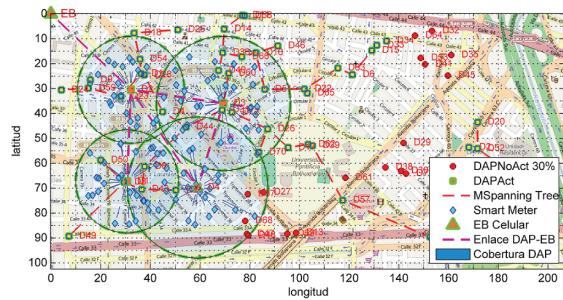


Figura 4: Minimum Spanning Tree & Cluster de Smart Meters

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El algoritmo planteado permite optimizar el número de UDAP activos de una infraestructura AMI que contiene el tráfico proveniente de los medidores inteligentes; además de ubicar los sitios candidatos para colocar dichos UDAP y calcular la mínima distancia desde los UDAP hasta llegar a la BS más cercana. De esta forma, la optimización aplicada se relaciona de manera directa con el costo de despliegue de la infraestructura de comunicación en la que se optimiza el uso de los enlace a través de los saltos formado así un árbol de expansión mínimo.

En el diseño de red, mantener puntos factibles geo-referenciados permite establecer un diseño apegado a las características propias de la localidad en donde se desea desplegar la red. Por supuesto, identificar las características de implementar estos datos es imprescindible para ejecutar algoritmos adecuados en el desarrollo de un óptimo dimensionamiento

Sabiendo que cada nodo trabaja con 10 a 100Kbps, cada UDAP puede trabajar con 100 a 1000 medidores [18]. De acuerdo con esto, si se busca reducir la cantidad de ancho de banda usado por los datos obtenidos por los equipos AMI que envían información a los diferentes concentradores con el objeto de incrementar la cantidad de medidor por UDAP, cada medidor podría implementar CS.

Trabajos futuros buscarán el análisis de compresión de datos a través de técnicas modernas así como el análisis de estas para diversos estándares con el fin de mejorar la transferencia de datos de AMI dentro de las redes inteligentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. L. H. Li, R. M. R. Mao, L. L. L. Lai, and R. C. Qiu, "Compressed Meter Reading for Delay-Sensitive and Secure Load Report in Smart Grid," *Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*, 2010 First IEEE Int. Conf., pp. 114–119, 2010.
- [2] H. Li, S. Gong, L. Lai, Z. Han, R. C. Qiu, and D. Yang, "Efficient and Secure Wireless Communications for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1540–1551, Sep. 2012.
- [3] M. E. Eltayeb, H. R. Bahrami, and T. Y. Al-Naffouri, "On the efficiency and privacy of smart grids neighborhood area networks," 2013 IEEE Energytech, Energytech 2013, 2013.
- [4] D.-M. Han and J.-H. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, 2010.
- [5] A.-A. Mahmood and E. S. Elmallah, "An Algorithm for Incremental Joint Routing and Scheduling in Wireless Mesh Networks," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2010 IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [6] A. Capone, M. Cesana, D. De Donno, and I. Filippini, "Deploying multiple interconnected gateways in heterogeneous wireless sensor networks: An optimization approach," *Comput. Commun. - Elsevier*, vol. 33, no. 10, pp. 1151–1161, Jun. 2010.
- [7] P. Kulkarni, S. Gormus, and Z. Fan, "Tree Balancing in Smart Grid Advanced Metering Infrastructure Mesh Networks," in 2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom), 2012, pp. 109–115.
- [8] R. Ratasuk, S. Iraj, K. Hugl, L. Wang, and A. Ghosh, "Performance of Low-Cost LTE Devices for Advanced Metering Infrastructure," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013 IEEE 77th, 2013, pp. 1–5.
- [9] G. Rajalingham, Q.-D. Ho, and T. Le-Ngoc, "Evaluation of an efficient Smart Grid communication system at the neighbor area level," in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2014 IEEE 11th, 2014, pp. 426–431.
- [10] Q.-D. Ho, Y. Gao, G. Rajalingham, and T. Le-Ngoc, "Performance and applicability of candidate routing protocols for smart grid's wireless mesh neighbor area networks," in *Communications (ICC)*, 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 3682–3687.
- [11] C.-J. Tang and M.-R. Dai, "An Evaluation on Sensor Network Technologies for AMI Associated Mudslide Warning System," in 2010 First International Conference on Networking and Computing (ICNC), 2010, pp. 237–242.
- [12] G. Barai and K. Raahemifar, "Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2014 IEEE 27th Canadian Conference on, 2014, pp. 1–6.
- [13] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, "Optimum deployment of FiWi Networks using wireless sensors based on Universal Data Aggregation Points," in *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2015 - Conference Proceedings*, 2015, pp. 1–6.
- [14] T. Otani and M. Miyashita, "Characteristics of AMI using DLMS/COSEM and IEEE 802.15.4g multi-hop wireless communication," in 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013, pp. 324–329.
- [15] G. Souza, F. V. Mestrando, C. Lima, M. Castro, and A. e Sergio, "Optimal positioning of GPRS concentrators for minimizing node hops in smart grids considering routing in mesh networks," 2013 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. (ISGT Lat. Am.), pp. 1–7, Apr. 2013.
- [16] S. Li and J. Huang, "Dynamic Profit Maximization of Cognitive Mobile Virtual Network Operator," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 3, pp. 526–540, 2013.

- [17] L. S. de Assis, P. M. Franca, and F. L. Usberti, "A redistricting problem applied to meter reading in power distribution networks," *Comput. Oper. Res. - Elsevier*, vol. 41, pp. 65–75, Jan. 2014.
- [18] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapie, "Optimal deployment of cellular networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2014 - Conf. Proc.*, 2014.
- [19] E. Inga, R. Hincapié, C. Suárez, and G. Arévalo, "Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure using Cellular Networks," *Commun. Comput. (COLCOM), 2015 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [20] A. G. Peralta-Sevilla, F. Amaya-Fernandez, and R. Hincapie, "Multiservice hybrid WDM/TDM-PON dimensioning using a heuristic method," 2014, pp. 1–5.
- [21] Inga Esteban, "Redes de Comunicación en Smart Grid," *Ingenius*, vol. 7, p. 18, 2012.
- [22] Arturo G. Peralta Sevilla and Ferney Amata Fernández, "Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina," *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 8, pp. 1–14, 2013.
- [23] E. Inga Ortega, D. Arias Cazco, V. Orejuela Luna, and J. Inga Ortega, "Comunicaciones Celulares para medición inteligente de energía eléctrica en sistemas de distribución," *Ingenius*, pp. 21–33, 2013.
- [24] R. Hincapie, J. Tang, G. Xue, and R. Bustamante, "QoS routing in wireless mesh networks with cognitive radios," 2008, pp. 1–5.
- [25] R. Hincapie, L. Zhang, J. Tang, G. Xue, R. S. Wolff, and R. Bustamante, "Efficient Recovery Algorithms for Wireless Mesh Networks with Cognitive Radios," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1–5.
- [26] J. P. Inga-Ortega and E. Ordonez, "Modelos de negocios para OMV en el Ecuador," *Ingenius*, vol. 9, pp. 50–56, 2013.
- [27] R. Ranganathan, R. Qiu, Z. Hu, S. Hou, M. Pazos-Revilla, G. Zheng, Z. Chen, and N. Guo, "Cognitive radio for smart grid: Theory, algorithms, and security," *Int. J. Digit. Multimed. Broadcast.*, vol. 2011, 2011.
- [28] E. Bou-Harb, C. Fachkha, M. Pourzandi, M. Debbabi, and C. Assi, "Communication security for smart grid distribution networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2013.
- [29] H. S. Cho, T. Yamazaki, and M. Hahn, "Determining location of appliances from multi-hop tree structures of power strip type smart meters," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 2314–2322, 2009.
- [30] F. McLoughlin, A. Duffy, and M. Conlon, "Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study," *Energy Build.*, vol. 48, pp. 240–248, May 2012.
- [31] W. Song, B. Zhang, and W. Xiaorong, "Compressive Sensing for Smart Grid Wireless Network," *Ad Hoc Sens. Wirel. Networks*, vol. 20, pp. 179–193, 2012.
- [32] J. Zhou, R. Q. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," *Parallel Distrib. Syst. IEEE Trans.*, vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [33] S. Cai, J. Ye, M. Chen, J. Yan, and S. Jaggi, "Secure Compressed Reading in Smart Grids," *Cornell Univ. Libr. - Comput. Sci. > Inf. Theory*, vol. arXiv:1202, 2012.
- [34] G. Yang, V. Y. F. Tan, C. K. Ho, S. H. Ting, and Y. L. Guan, "Wireless Compressive Sensing for Energy Harvesting Sensor Nodes," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 18, pp. 4491–4505, Sep. 2013.
- [35] X. Yang, X. Tao, E. Dutkiewicz, X. Huang, Y. J. Guo, and Q. Cui, "Energy-Efficient Distributed Data Storage for Wireless Sensor Networks Based on Compressed Sensing and Network Coding," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 5087–5099, Oct. 2013.



Juan Inga.- Graduado de la Universidad Politécnica Salesiana como Magíster del Programa de Gestión de las Telecomunicaciones en 2013. Es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador y es miembro del

Grupo de Investigación de las Telecomunicaciones (GITEL). Actualmente se está trabajando para su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia.

se basa en técnicas de modelado y simulación matemáticos. Sus intereses de investigación incluyen la asignación de recursos en redes mallas inalámbricas, planificación de redes e ingeniería de tele-tráfico, con aplicaciones a la calidad del servicio y la cobertura rural.



Esteban Inga.- Graduado de la Universidad Politécnica Salesiana, es recibido el grado de M.Ed. en educación y desarrollo social en la Universidad Tecnológica Equinoccial en 2008. Actualmente está

trabajando para su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Su interés por la investigación son las comunicaciones celulares en la medición avanzada infraestructura- redes inteligentes. Es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador y director de Ingeniería Eléctrica. Coordinador del Grupo de Investigación GIREI



Cristina Gómez.- Recibió el grado de doctorado en la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Actualmente es profesor de ingeniería de telecomunicaciones con la Universidad Pontificia

Bolivariana – Colombia – Medellín y es miembro del Grupo de Investigación GIDATI.



Roberto Hincapié.- Recibió el grado de B.S. en ingeniería electrónica, grado de M.S. en ingeniería y el grado de Ph.D. en ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia en los años de

1996, 2005, y 2009, respectivamente. En la actualidad es profesor asistente de ingeniería de telecomunicaciones con la Universidad Pontificia Bolivariana – Colombia – Medellín y es miembro del Grupo de Investigación GIDATI. Su trabajo