

**PLANEACIÓN Y DESPLIEGUE DE LA RED DE SENSORES
INALÁMBRICOS REQUERIDA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE
ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO RESTRICCIONES DE CAPACIDAD Y
COBERTURA.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
PLANEACIÓN Y DESPLIEGUE DE LA RED DE SENSORES
INALÁMBRICOS REQUERIDA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE
ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO RESTRICCIONES DE CAPACIDAD Y
COBERTURA.**

**AUTOR:
MIGUEL ÁNGEL CAMPAÑA MOLINA**

**DIRECTOR:
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA**

Quito, julio 2017.

Miguel Ángel Campaña Molina

**PLANEACIÓN Y DESPLIEGUE DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS
REQUERIDA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA
USANDO RESTRICCIONES DE CAPACIDAD Y COBERTURA.**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Miguel Ángel Campaña Molina (Y'1989-M'05). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Experimental Salesiano Don Bosco “Kennedy”, se graduó de Técnico Industrial en la especialidad de Electricidad-Electrónica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en infraestructuras de medición avanzada, red inteligente, redes inalámbricas heterogéneas, planificación de redes inalámbricas inteligentes para medición de energía eléctrica.

mcampana@ups.edu.ec

Dirigido por:



Esteban Mauricio Inga Ortega (Y'1976-M'08). Esteban Inga se graduó de la Universidad Politécnica Salesiana en 2002; Recibió su M.Ed. Licenciado en Educación y Desarrollo Social por la Universidad Tecnológica Equinoccial en 2008; Recibió su M.Sc. Grado en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, en 2017. Actualmente trabaja para su doctorado. Licenciado en Ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Sus intereses de investigación están en comunicaciones verdes, infraestructura de medición avanzada, red inteligente, redes inalámbricas heterogéneas, planificación de redes inalámbricas. Es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, es Coordinador del Grupo de Investigación GIREI y Director del Programa de Ingeniería Eléctrica.

einga@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

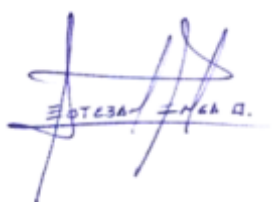
DERECHOS RESERVADOS

©2017 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Esteban Inga Ortega declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Planeación y despliegue de la red de sensores inalámbricos requerida para medición inteligente de energía eléctrica usando restricciones de capacidad y cobertura*” realizado por Miguel Ángel Campaña Molina, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'ESTEBAN INGA O.', with a horizontal line drawn through the middle of the signature.

.....

Esteban Mauricio Inga Ortega

Cédula de identidad: 0102116043

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Miguel Ángel Campaña Molina, con documento de identificación N° 1723209142, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: *“Planeación y despliegue de la red de sensores inalámbricos requerida para medición inteligente de energía usando restricciones de capacidades y cobertura”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....

Nombre: Miguel Ángel Campaña Molina

Cédula: 1723209142

Quito, julio de 2017

INDICE GENERAL

Resumen.....	6
Abstract	6
1. Introducción	7
2. Red Heterogénea de Sensores Inalámbricos bajo el concepto de AMI	12
2.1 Árbol Balanceado mediante Restricciones de Capacidad y Cobertura.	13
3. Formulación del problema	14
3.1 Algoritmo Algoritmo-Mínimo árbol de expansión.	17
4. Análisis de resultados	18
5. Conclusiones.....	23
6. Referencias.....	24

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planeación y Despliegue de Sensores Inalámbricos bajo el concepto de AMI.	9
Figura 2. Niveles en redes heterogéneas para la recopilación de Datos [49].	13
Figura 3. Arquitectura de Medidor Inteligente o PAD.....	13
Figura 4. Matriz de distancias representativa desde un PAD hacia la EB en una densidad de 32 SI.	19
Figura 5. Representación gráfica de la matriz binaria de conectividad o adyacencia para una densidad de SI de 32.	19
Figura 6. Solución global mediante diferentes exploraciones.	20
Figura 7. Despliegue óptimo de SI para MEE.....	21
Figura 8. Uso de enlace en diferentes densidades de SMs.....	21
Figura 9. Pérdidas por propagación en el espacio libre calculados a una frecuencia de 2.4 GHz.....	22
Figura 10. Comportamiento del costo en función del uso de enlace.....	22
Figura 11. Comportamiento del costo en función de diferentes densidades de SI.....	23

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros iniciales de ingreso.	18
--	----

PLANEACIÓN Y DESPLIEGUE DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS REQUERIDA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO RESTRICCIONES DE CAPACIDAD Y COBERTURA.

Resumen

La medición de energía eléctrica (MEE), busca proporcionar servicios de calidad sin descuidar la confiabilidad del sistema. Por lo tanto, un servicio de calidad debe ir estrechamente ligada a las tecnologías de comunicación inalámbrica, para tecnificar la MEE, no solo lectura, sino también cortes, reconexiones, y otros servicios adicionales que la infraestructura de medición inteligente provee a través de tecnologías inalámbricas como celular o WiFi, cada vez más comunes debido a la confiabilidad que estas brindan en la transmisión de datos en tiempo real [1]. Las infraestructuras inalámbricas nos permiten brindar cobertura a los terminales fijos, determinados por el medidor eléctrico, y a su vez gestionar y planificar el óptimo despliegue de sensores inalámbricos (SI) en áreas finitas, ya sean, urbanas, rurales o suburbanas. Este artículo propone un modelo óptimo de planeación y despliegue de SI para la MEE con la finalidad de garantizar enlaces de comunicación inalámbricos confiables al menor costo de implementación. Por lo tanto, el algoritmo propuesto da soluciones globales dentro de un escenario finito, haciendo de este un modelo escalable en el tiempo capaz de gestionar el uso de enlaces disponibles. Los SI para la MEE, son insertados en las Redes de Área Vecindaria (NAN) cubiertas por la red de comunicaciones móviles.

Palabras Clave: AMI, Capacidad, Cobertura, Redes Inteligentes, Redes Inalámbricas Heterogéneas, Punto de Agregación de Datos, Árbol Balanceado, RSI.

Abstract

The electrical energy measurement (EEM), seeks to provide quality services without neglecting the reliability of the system. Therefore, a quality service must be closely linked to the wireless communication technologies, to technify the EEM, not only reading, but also cuts, reconnections, and other additional services that the intelligent measurement infrastructure provides through wireless technologies. Such as cell or WiFi, increasingly common because of the reliability they provide in real-time data transmission. Wireless infrastructures allow us to provide coverage to the fixed terminals, determined by the electric meter, and in turn manage and plan the optimal deployment of wireless sensors (SI) in finite areas, whether urban, rural or suburban. This article proposes an optimal model for planning and deploying SI for the EEM in order to guarantee reliable wireless communication links at the lowest implementation cost. Therefore, the proposed algorithm gives global solutions within a finite scenario, making this a scalable model in time able to manage the use of available links. The SIs for the EEM are inserted into the Neighborhood Area Networks (NANs) covered by the mobile communications network.

Keywords: AMI, Capacity, Coverage, Smart Grid, Heterogeneous Wireless Networks, Data Aggregation Point, Balanced Tree, RSI.

1. Introducción

En la actualidad el concepto de redes eléctricas inteligentes ha tomado un interés importante por parte de la comunidad científica, buscando acondicionar al sistema eléctrico tradicional, en un sistema eficiente y confiable.

Varias son las etapas que las conforman, pero este particular trabajo se enfoca en la infraestructura de medición inteligente y cómo desplegar de manera óptima la red de comunicaciones que permita realizar la medición inteligente de energía eléctrica con el mínimo costo.

Entonces, se plantea el problema, basado en un despliegue óptimo de SI con el mínimo costo. Este problema tiene una característica combinatorial y en ciertos trabajos se han definido como NP-Complete, de esta manera se aplica un modelo heurístico, que permita relajar el proceso de búsqueda de una solución aproximada y basada en restricciones de capacidad y cobertura con el costo mínimo en los recursos empleados para el despliegue [2] [3].

Para realizar el trabajo de medición inteligente se requiere de medidores inteligentes (Smart Meters - SM), que tecnológicamente en la actualidad pueden disponer de varios slots para insertar tarjetas de comunicación del tipo WiFi; Celular; IEEE 802.15.4g entre otros, de tal manera que, cada empresa de distribución eléctrica advierte una posibilidad considerable de posibles opciones de enlaces inalámbricos según el escenario a ser desplegada la red. Es así que una red única celular de inicio resultaría muy costosa incluso en [4] se advierte la posibilidad de una minimización del recurso, en cuanto al uso de alcances celulares se refiere y, a través de un operador móvil de red reducir el arrendamiento del espectro total.

De acuerdo a esta premisa, el modelo plantea que todos los medidores inteligentes de inicio cuentan con una tarjeta de comunicaciones celular, situación muy costosa para inversión de medición inteligente de energía eléctrica. La heurística propuesta, presenta la opción de reducir el costo cambiando la tecnología de acceso celular por tecnología WiFi, pero considerando la mejor cobertura y la capacidad máxima admisible de cada una de las tarjetas inalámbricas involucradas.

El proceso de búsqueda advierte un enrutamiento multi salto entre medidores inteligentes hasta su conectividad con una estación base (EB) celular. Se asume que el último enlace de última milla existe entre las estaciones base celular y la oficina central de la empresa eléctrica de distribución.

En función del número de medidores inteligentes a ser desplegados se advierte una población escalable; por lo tanto, es necesario considerar, que ciertos medidores inteligentes pueden quedar sin cobertura WiFi, para estos casos la tecnología celular será de indudable uso.

Cuando hablamos de capacidad, relacionamos el concepto de conglomerados o agrupación. En este trabajo no sean empleado técnicas de clusterización como k-means; k-medoids o mean shift, debido a que restringe el espacio de búsqueda y, por tanto, descarta la posibilidad de encontrar otra posición para colocar la tecnología que se encargará de ser el concentrador de dicho conglomerado de medidores inteligentes.

La posición del medidor inteligente que hace de cabeza del conglomerado tendrá disponible dos tipos de tecnologías: un enlace WiFi para interconexión con otros medidores inteligentes en multi salto y una tecnología celular que le permitirá

conexión con la EB celular y, en consecuencia, esta última, tendrá conectividad de última milla con el centro de control.

Así, al disponer de una red de sensores inalámbricos (RSI) para medición inteligente de energía eléctrica desplegados en un área finita, estos forman conjuntos que se asemejan a dispositivos móviles, pero con cero movilidad [2][5] permitiendo de esta manera la gestión del espectro radioeléctrico. Los sensores inalámbricos se encargarán de monitorear y recolectar parámetros eléctricos de cada abonado dentro de un área de cobertura [6].

El modelo propuesto considera métodos no tradicionales de clusterización, enrutamiento y selección óptima de ubicación de puntos de agregación de datos (PAD) que, desplegados en un área finita se encargarán de recolectar parámetros eléctricos [5][7] y transmitir la información. La información será recolectada de usuarios residenciales, comerciales e industriales y enviadas a las EBs más cercanas [8][9][10], además, es importante mencionar que, mediante los sensores inalámbricos o medidores inteligentes de energía eléctrica, se puede obtener datos, tales como, generación de reactivos, generación distribuida [11]. La transmisión de la información desde los PADs hacia las EBs únicamente se efectuará cuando cada PAD haya recibido toda la información de cada SI perteneciente al clúster. Los PADs son conocidos también como puntos de transición entre los SI y las EB [8]. La información se transmitirá mediante saltos, en caso de ser necesario, mediante una topología de enrutamiento basada en árboles, de tal manera que, ayude a mejorar la velocidad de transmisión [12][13][14][15] introduciendo de esta manera el concepto de [16], que es una

operación fundamental en redes de sensores inalámbricos [13]. Los problemas de los costos de implementación dependerán de las tecnologías inalámbricas que se vaya aplicar en una infraestructura de medición inteligente. Por lo tanto, proponemos la construcción de infraestructuras híbridas mediante tecnologías WiFi y celular. El uso de más de una tecnología permite gestionar de mejor manera el uso de enlaces ayudándonos a reducir costos de implementación y operación durante la vida útil del proyecto. Las desventajas que presenta el uso de una única tecnología se ven reflejadas en costos [17][18], ya que estos son muy elevados o por el contrario no garantiza óptimos enlaces de comunicación o una permanencia de la información durante su recorrido hasta llegar a las EB. Sabemos que la diferencia entre las tecnologías citadas (WiFi y Celular) radica en costos y distancias de cobertura máximas permitidas, los cuales, se tornan factores esenciales en el momento de decidir sobre el tipo de infraestructura y topología a emplear. La topología juega un papel de mucha importancia en la minimización de varias restricciones, tales como, energía limitada, latencia, recursos computacionales y la calidad de comunicación [19][20].

Al disponer de SI fijos desplegados en un área finita, con la finalidad de monitorear parámetros eléctricos, dentro de rangos de cobertura y capacidades máximas admisibles, nos enfrentamos a un problema de decisión, el cual consiste en: determinar el despliegue óptimo de puntos de agregación de datos, el número necesario de PADs y la capacidad de cada uno de ellos para cubrir la mayor demanda de tráfico [21]. Es importante tener en cuenta que, un PAD no es nada

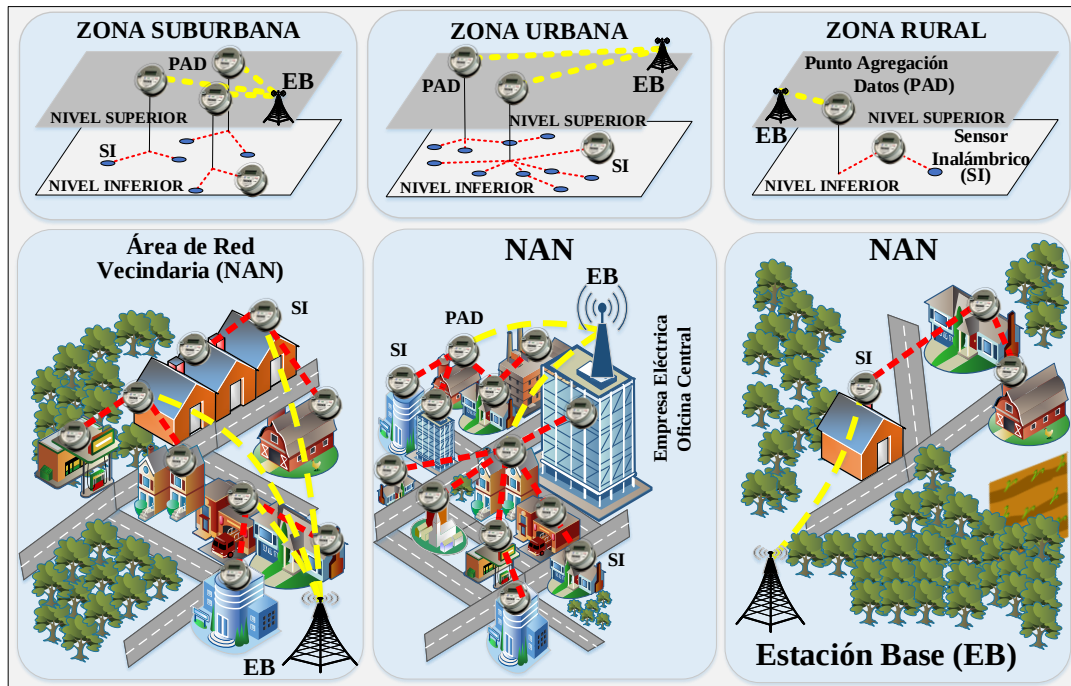


Figura 1. Planeación y Despliegue de Sensores Inalámbricos bajo el concepto de AMI.

más de un SI, que dispone de doble tarjeta (WiFi y Celular), que se insertan en dispositivos de medición y electrónica de consumo, mientras que, un SI únicamente dispone de un slot para alojar una tarjeta, insertada en el instrumento de medida de consumo eléctrico [22], que para el caso es WiFi. La Figura 1, donde se ilustra una posible infraestructura de medición avanzada, se dispone de dos niveles identificados como inferior y superior, dónde se puede apreciar claramente que: en el nivel superior se construye una red inalámbrica con tecnología celular (representada de color amarillo), justificada por las grandes distancias existentes entre los PADs y las EBs. Por otro lado, el nivel inferior se construye a partir de los conglomerados o clústeres de SI, los mismos que, transmiten los datos a sus PADs correspondientes mediante tecnología WiFi (representado de color rojo), puesto que, sus distancias son cortas y no requiere una tecnología de mayor costo como la que se requiere en la capa superior. Por lo tanto, en un

escenario, donde se encuentran desplegados SI, en un área determinada, se forman clústeres bajo criterios de capacidad y cobertura. Estos clústeres están constituidos por un nodo de transición PAD dentro de cada conglomerado, el mismo que se encargará de retransmitir la información recolectada de los nodos intra-clúster alcanzando así el criterio de escalabilidad de la red [23][24][25]. Por lo tanto, los elementos constitutivos de cada nivel quedan identificados de la siguiente manera: en el nivel superior mediante enlaces vía Celular, se ubican los nodos de transición PADs (sensores inalámbricos con doble tarjeta) y la radio base; en el nivel inferior se ubica los conglomerados de los SI enlazados mediante tecnología WiFi hacia sus nodos de transición correspondientes. En este trabajo se propone una heurística de decisión para la ubicación óptima de PADs y la construcción de infraestructuras de medición avanzada sujeta a las restricciones de capacidad y cobertura, aplicando teoría de grafos de

complejidad NP-Complete [8]. Esta heurística nos permitirá planificar y gestionar despliegues óptimos de RSI para medición inteligente de energía eléctrica mediante la ubicación del mínimo número de PADs requeridos para satisfacer de cobertura aceptable hacia los abonados del servicio eléctrico. Además, nos permitirá reducir significativamente los costos iniciales de inversión garantizando una infraestructura óptima para el transporte de la información procedentes de los SI ubicados a grandes distancias de las estaciones base [26].

El objetivo general es poder crear un modelo de búsqueda aleatoria que nos permita realizar una planeación y despliegue adecuado de la red de sensores inalámbricos, basándose en restricciones de capacidad y cobertura, con la finalidad de ubicar el mínimo número de nodos de transición adecuadamente. Además, nos permitirá identificar cada uno de los niveles (propios de una red heterogénea) de la infraestructura proporcionándonos métricas tales como: número de PADs requeridos, número de enlaces WiFi, número de enlaces Celular y cantidad de sensores inalámbricos por cada agrupación en el nivel inferior. Por último, proporciona gráficamente la topología requerida por AMI al menor costo garantizando eficiencia y confiabilidad de la red inalámbrica heterogénea.

Se realizará el análisis considerando diferentes densidades de SI. La combinación de tecnologías inalámbricas nos permitirá indudablemente reducir costos, permitiéndonos, así mismo, flexibilizar [27] la gestión y planificación de RSI. Se considera, como criterio de partida, diferentes escenarios de n SI que se despliegan en una región finita, los

mismos que, son considerados inicialmente todos como PADs, esto implica que, todos se comunican mediante tecnología celular, haciendo que su implementación sea muy costosa. Posteriormente se eliminan enlaces directos hacia las estaciones base, mediante la conformación de los conglomerados, ya que, estos se conectarán a sus respectivos PADs eliminando sus enlaces directos con las EB. Los enlaces intra-clúster se realizarán mediante enlaces WiFi. El método de clusterización, para conformar los diferentes conglomerados, sujetos a restricciones de capacidad y cobertura, no se basa en técnicas tradicionales como: k-means y k-medoids, puesto que, estos métodos triviales no pueden lograr la mejor respuesta debido a su imposibilidad de explorar entre varias posibilidades, lo que hace que, posiblemente quede atrapado en soluciones óptimas locales. Además, estos algoritmos poseen sensibilidad al centro de datos y son incapaces de detectar racimos no esféricos [28].

Los costos relacionados para la implementación de AMI son sensibles a la tecnología que se vaya aplicar. Sin embargo, el modelo propuesto en este documento es capaz de reducir esos costos, logrando una infraestructura híbrida a dos niveles, proporcionando rangos de cobertura mínimos dentro de un escenario complejo en el que se involucran zonas urbanas, sub-urbanas y rurales como se puede apreciar en la Figura 1. Sin embargo, surge una gran interrogante *¿Cuál es la topología, el número necesario de PADs, la ubicación óptima de los puntos de agregación de datos y los elementos constitutivos de cada nivel, dentro de un área finita donde se despliegan SI para medición inteligente de energía eléctrica, los cuales satisfagan la máxima cobertura minimizando costos*

iniciales y costos de operación en la infraestructura de medición avanzada?

El aporte del modelo propuesto consiste en definir claramente los niveles inferior y superior. Para poder determinar cada uno de estos niveles, es muy importante identificar los conglomerados con sus respectivos nodos de transición [29] bajo criterios de capacidad y radios de cobertura. Para la construcción de los conglomerados utilizaremos el algoritmo de PRIM que, mediante una variante en su estructura original, nos permite restringir el número de nodos de cada conglomerado y saltos permitidos para la formación de los racimos, además, considera distancias máximas permitidas para los respectivos enlaces a cada clúster. Una vez identificadas las agrupaciones, constituidas por sensores inalámbricos, el algoritmo selecciona, de cada agrupación, al nodo más cercano [30] hacia la EB, logrando así, determinar la posición idónea para la instalación de un PAD, el mismo que, servida como nodo de transición en el nivel inferior mediante enlaces WiFi y formará parte del nivel superior mediante enlaces celular. Posteriormente, para el enrutamiento mediante el criterio de caminos cortos, se utiliza el algoritmo de Dijkstra, dando lugar a la topología tipo árbol, que nos permitirá recolectar datos garantizando el transporte de la información desde el nodo más alejado hasta la EB. Por lo tanto, al construir topologías sujetas a restricciones [31] se obtendrá estructuras balanceadas, logrando así, equilibrar la cantidad de flujo de datos a transmitir en cada uno de los trayectos [4] disminuyendo al máximo posible el consumo de energía necesaria para transmitir la información desde los nodos más alejados de las estaciones base. Otro aporte es que, el algoritmo es capaz de explorar diferentes posibilidades dentro del mismo escenario y

almacenar los resultados para que al final de las iteraciones nos proporcione la solución óptima global. En consecuencia, el modelo propuesto, es escalable en el tiempo y proporciona soluciones óptimas globales, logrando con ello, satisfacer los requerimientos necesarios básicos de AMI [32] [33] [34]. Por lo tanto, el algoritmo es capaz de construir un árbol de decisión balanceado con el mínimo número de saltos, mínimo número de PADs requeridos por la infraestructura, es un algoritmo finito, logra reducir los costos de implementación formando estructuras híbridas de comunicación confiables y brinda soluciones óptimas globales mixtas sustentables en el tiempo requeridos en infraestructuras de medición inteligente [35].

Mediante el presente trabajo, damos solución al problema de decisión, el cual consiste en, determinar la ubicación óptima de PADs desplegados en un área finita minimizando recursos para la implementación de AMI, garantizando eficiencia y confiabilidad en cuanto al transporte de información se refiere [36], cubriendo al máximo de cobertura al área disponible de concesión. La aplicación de sistemas híbridos [12] nos permite reducir significativamente los costos de implementación de la infraestructura mediante la planeación y despliegue óptimo de sensores inalámbricos.

Para validar nuestro modelo propuesto se ejecuta varias simulaciones basándose en los parámetros de medición inteligente, creando escenarios diversos variando la densidad instalada de sensores inalámbricos y la aleatoriedad del punto de arranque para la formación de los conglomerados. Al crear diferentes escenarios se logra demostrar el rendimiento óptimo de la heurística propuesta.

En adelante este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se introduce los requisitos fundamentales de redes híbridas de sensores inalámbricos que, bajo el concepto de AMI, es objeto de estudio del presente documento. En la sección III se plantea la formulación del problema. En la sección IV se realiza el despliegue óptimo de sensores inalámbricos identificando cada uno de sus niveles. Finalmente, en la sección V concluimos nuestro artículo.

2. Red Heterogénea de Sensores Inalámbricos bajo el concepto de AMI

En redes de sensores inalámbricos (RSI) se debe considerar aspectos de mucha importancia, tales como, enrutamiento fiable, ubicación segura y agregación segura de datos [37]. RSIs está constituido a partir de dos elementos básicos: muchos nodos de sensores y uno o varios concentradores (nodos de transición) [23] [38]. Dependiendo de la aplicación de los nodos de sensores inalámbricos estos se despliegan al azar o son simplemente de carácter fijo, lo cierto es que, ambos casos forman una red dentro de una área de cobertura determinada [23]. En el caso práctico de medición inteligente (Smart-Metering SM), los nodos capturan información de algunos parámetros eléctricos y transmiten los datos a los concentradores o nodos de transición PADs [8] [38] para que ellos se encarguen de retransmitir, aquellos datos, a las estaciones base más cercanas. Las EB se encargarán de acumular la información del total de sensores inalámbricos del área de concesión para posteriormente enviar a los centros de control [39], como por ejemplo por parte de una Empresa Eléctrica (ver Figura 1). Por lo tanto,

los algoritmos de planeación, despliegue, enrutamiento y gestión de enlaces juegan un papel muy importante en RSI, ya que, estos métodos primarios no solo alarga la vida útil de los nodos [40], sino que, también es capaz de reducir el consumo de energía al transmitir los datos [38][41]. Para el desarrollo de modelos heurísticos de búsqueda es necesario considerar parámetros de diseño de red, tales como: densidad de nodos, rangos de detección y rangos de transmisión [42].

En la actualidad, para lograr una óptima gestión bajo el concepto de infraestructura de medición avanzada, es necesario garantizar flujos de datos bidireccionales entre usuarios final (abonado) y los centros de control [43][44]. AMI consta de tres componentes básicos, los cuales son: dispositivos de medición inteligente inalámbricos en el extremo del usuario final, vía de comunicación bidireccional entre abonados y centros de control, y software automatizado dentro de un centro de operaciones para el procesamiento de datos [43]. Como se ha expuesto en los párrafos anteriores, el uso de una única tecnología, para la transmisión de datos, hace que la infraestructura sea inflexible limitando procesos adecuados óptimos en el diseño de la red. Por lo tanto, la solución hoy en día, para llevar acabo procesos adecuados de diseño de infraestructuras avanzadas de medición, es el uso de redes heterogéneas, donde se combinan más de una tecnología en beneficio de la red, garantizando la permanencia de la información a lo largo de la vía de comunicación hasta llegar al centro de control, donde se procesan los datos [45]. Debido a la creciente demanda, las redes inalámbricas necesariamente se tornarán heterogéneas combinando múltiples tecnologías. Entre las tecnologías aplicadas disponemos de

redes celulares IEEE 802.11 (Wi-Fi) y 3.5G/4G [46] [47], las mismas que, son los métodos de acceso inalámbricos más populares para usuarios móviles, con la diferencia que en redes de sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica, su aplicación y ubicación son de carácter fijo.

Partiremos haciendo los siguientes supuestos; los nodos de sensores están distribuidos aleatoriamente en un área determinada, todos los sensores inalámbricos tienen la opción de ser nodos de transición PADs, los cuales, se conectan a las EBs más cercanas [48], es decir, únicamente existiría el nivel superior donde se efectúan enlaces vía celular. Posteriormente se forman los conglomerados, bajo criterios de capacidad y cobertura, y se determina el número necesario de PADs, surgiendo así el segundo nivel, como se muestra en la figura 2.

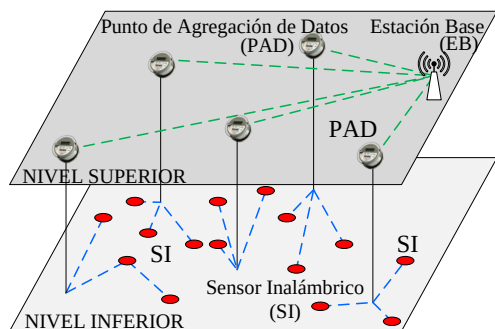


Figura 2. Niveles en redes heterogéneas para la recopilación de Datos [49].

En nuestro método, los nodos de transición PADs, ubicados en el nivel superior, se organizan en racimos como se grafica en la Figura 2. La característica fundamental de un PAD, en el caso de estudio, radica en poseer doble tarjeta incorporada en el medidor inteligente, es decir, un punto de agregación de datos es un medidor inteligente con doble tarjeta de acceso inalámbrico (WiFi y Celular), diferenciándose así de un medidor inteligente del nivel inferior que únicamente disponen de una sola

tarjeta de acceso inalámbrico WiFi. En la Figura 2., se puede apreciar los dos niveles básicos constitutivos de infraestructuras de medición avanzada



Figura 3. Arquitectura de Medidor Inteligente o PAD.

además, se identifica los elementos y tipos de enlaces necesarios para garantizar la permanencia de los datos hasta llegar al centro de control. El nivel superior está constituido por los PADs que son medidores inteligentes con sensores inalámbricos de doble disponibilidad de tecnología, ver Figura 2 y 3 y por la EB, mientras que, en el nivel inferior se ubican los conglomerados con enlaces intra-clúster mediante acceso WiFi. Por lo tanto, los puntos de agregación de datos del nivel superior son capaces de recibir la información proveniente de los sensores inalámbricos de medición de energía eléctrica mediante enlaces WiFi en el nivel inferior, representados de color azul en la Figura 2., y reenviar estos datos recibidos mediante tecnología celular, representado de color verde en la Figura 2, en el nivel superior.

2.1 Árbol Balanceado mediante Restricciones de Capacidad y Cobertura.

En la planificación de infraestructuras de comunicación inalámbrica se debe considerar: la demanda del tráfico para cubrir una región específica, la disponibilidad de estaciones base, la capacidad de canal disponible en cada

PAD, radios de cobertura permitidos, los mismos que están asociados a la calidad de la señal, y la calidad de servicio en diversas áreas potenciales de demanda de tráfico [21] [25]. Para poder dar solución al problema planteado, es de mucha importancia tener en cuenta las restricciones con la finalidad de obtener estructuras balanceadas para la transmisión de datos en una estructura de topología de árbol. Un grafo que no tiene ciclos y que conecta todos los puntos, se llama grafo bajo estructura de un árbol. En un grafo con n vértices, los arboles están constituidos por $n - 1$ aristas, y posee n^{n-2} arboles posibles. Una de las características que poseen las estructuras tipo árbol, es que, conectan todos los vértices utilizando el menor número de aristas.

La cobertura tiene que satisfacer un cierto nivel de demanda total de tráfico y proporcionar la intensidad adecuada de la señal recibida por cada abonado, dicho de otra manera, la cobertura nos permite observar a una región de interés [50]. Por lo tanto, el objetivo de la cobertura es garantizar que, cada punto o medidor inteligente no móvil en un espacio físico determinado, debe estar en un rango tal que, sea observable por al menos un nodo de transición PAD [25]. Sin embargo, si hablamos de capacidad y cobertura, el PAD, debe atender al usuario conectado considerando que cada punto de agregación de datos posee características específicas de radio y capacidad limitada en cuanto, al número de usuarios [10][51].

El modelo propuesto es escalable y da soluciones dependiendo de la tecnología que se disponga, es decir, se ajusta a la disponibilidad de recursos inalámbricos disponibles en el mercado. Por lo tanto, datos como límites de cobertura y capacidad disponibles, ingresan como parámetros

de restricciones y desde esa realidad se parte para los respectivos análisis de planeación y despliegue de sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica. La complejidad del número de enlaces o flujos de datos aumenta a medida que la capacidad máxima admisible de un PAD aumenta. En consecuencia, si el número de transmisiones aumenta, las topologías deberán ser modificadas y adaptadas, con la finalidad de obtener estructuras de racimos balanceados garantizando la confiabilidad y permanencia de la información a lo largo del trayecto desde los niveles inferiores hacia los superiores.

Al disponer de tecnología inalámbrica se debe tener presente las pérdidas en el espacio libre (Free Space Loss - FSL) el cual, presenta reducción en la potencia de la señal, lo cual sucede por el ensanchamiento del frente de onda a medida que se aleja del transmisor, por lo que, la densidad de potencia disminuye.

3. Formulación del problema

Existe n números de sensores inalámbricos para medición inteligente de energía eléctrica distribuidos aleatoriamente en un área A , $n(A)$. Al formar conglomerados se selecciona un nodo de transición (PAD) Z ubicado a distancias permitidas de radio de cobertura respecto a sus nodos incidentes (SI) X . Cada clúster tiene una capacidad de agrupar hasta m sensores inalámbricos para medición inteligente de energía eléctrica, de tal manera que, únicamente puede existir clústeres de hasta m sensores. Suponemos que el rango máximo de transmisión bidireccional de los sensores inalámbricos hacia los nodos de transición PADs es r_{sd} , en el nivel inferior, y desde los PADs hacia las EB, en el nivel superior, es de r_{db} . Es decir, cualquier pareja de nodos, ya sea en el nivel inferior o superior, cuya distancia

euclidiana este dentro de r_{ab} y r_{sd} respectivamente, pueden comunicarse entre sí. Debemos tener presente que, el radio de cobertura dependerá de la potencia configurada de las antenas según sea el objetivo a cubrir en una zona específica donde se encuentran desplegados sensores inalámbricos para medición avanzada de energía eléctrica. Se ejecutará varias exploraciones formando diferentes conglomerados con la finalidad de explorar entre varias posibles respuestas y determinar así la solución óptima global dentro del área finita especificada. En el nivel inferior, los nodos incidentes X que alcancen la distancia euclidiana permitida r_{ni} hacia Z , transmitirán la información en un solo salto h , caso contrario, aquellos nodos incidentes X que no alcancen la distancia máxima permitida r_{ni} en un solo salto hacia el nodo de transición Z , lo realizarán en el nivel inferior a dos saltos (si la capacidad de Z lo permite) a una distancia de $2 * r_{ni}$ como máximo, de esta manera se garantiza estabilidad en la red inalámbrica de sensores para medición de energía eléctrica, evitando así, aumentar el tráfico de datos logrando reducir los tiempos de entrega de la información a los nodos concentradores correspondientes. En el nivel superior los nodos de transición Z que no alcancen la distancia euclidiana r_{ns} máxima permitida, lo harán mediante saltos a una distancia máxima de $2 * r_{ns}$ garantizando la permanencia de la información durante el trayecto de la EB.

La distancia euclidiana entre los nodos incidentes $X - Z$ y $Z - BS$ se calcula de acuerdo a la expresión siguiente:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

Donde, d_{ij} es una súper matriz que almacena las distancias euclidianas existentes entre cada nodo perteneciente al área de interés, mientras que, x_i y y_i son coordenadas cartesianas del primer nodo y, x_j y y_j son las coordenadas del segundo nodo. El número de sensores inalámbricos se determina por la longitud del vector de coordenadas cartesianas. Se debe tener presente que la súper matriz debe ser de $n \times n$, es decir, cuadrada.

La red de sensores inalámbricos para medición inteligente de energía eléctrica esta modelada por un grafo $G = (V, E)$, donde, V representa el nodo v_0 de n nodos de sensores inalámbricos y E constituye el conjunto de aristas que, para el presente caso de estudio, representaría los enlaces [52] existentes entre cada nodo de la RSI para medición inteligente de energía eléctrica. Si dos nodos V se encuentran dentro del rango de cobertura entre sí, entonces hay un enlace E entre los dos nodos. Para que exista conectividad entre nodos es importante que el algoritmo sea capaz de construir el árbol, tomando en cuenta los criterios de capacidad y cobertura. Por lo tanto, para dar lugar a la formación de cada uno de los niveles, es necesario, en primera instancia, identificar cada uno de los conglomerados y seleccionar la cabeza del grupo Z .

Cada sensor inalámbrico de medición de energía eléctrica, en nuestro método, transmite sus datos por el camino más corto. El objetivo es transmitir desde cada sensor inalámbrico, más distante, pasando por nodos de transición hasta las EB más cercanas.

Por lo tanto, de esta manera se pretende organizar un óptimo despliegue y una correcta planificación con la finalidad de reducir costos iniciales de implementación de la red. La reducción

de costos radica en la ubicación óptima, cantidad necesaria de PADs para lograr transmisiones de datos óptimos al menor tiempo posible mediante una infraestructura confiable y mediante la reducción de enlaces inalámbricos de mayor costo.

Todos los sensores inalámbricos de transición se enlazan con tecnología celular hacia las estaciones base con un costo C_1 , por lo tanto, se supone que inicialmente todos los sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica se enlazan con tecnología celular, con lo cual, no existiría el nivel inferior solamente el superior.

Se ejecutará mediante una variación del algoritmo de PRIM la clusterización. Se considerará las restricciones de capacidad y distancias de coberturas máximas permitidas, identificando la cabeza de cada grupo. Cada grupo únicamente se conformará, si y solo si, la cantidad de nodos intra-clúster S , incluida la cabeza del grupo, es menor que, el número máximo de nodos permitido m . Una vez identificado los conglomerados y sus respectivas cabezas se eliminan los enlaces directos del nivel superior, dando lugar a la creación del segundo nivel mediante comunicación inalámbrica WiFi entre los nodos intra-clúster y la cabeza identificada de cada clúster, asociado a un costo C_2 (Ver Figura 2). Las variables C_1 y C_2 se identifican como costos unitarios por cada tipo de enlace inalámbrico, las mismas que, dependerán de la tecnología a utilizar, las cuales, estarán determinadas por el rango de cobertura y el nivel en el que nos encontremos, además, $C_1 \gg C_2$. Por lo tanto, el enlace intra-clúster (nivel inferior) se conectan a un costo C_{wf} y el enlace de los PADs con las EBs se conectan a un costo C_{cell} . A continuación, se presentan las ecuaciones 2 y 3, las cuales, expresan

los costos totales de enlace en cada nivel.

$$C_{wf} = C_2 * \sum_{j=1}^k (s_j - 1) \quad (2)$$

$$C_{cell} = C_1 * k \quad (3)$$

Donde,

k : es el número de PADs ubicados en el nivel superior.

j : índice de cada clúster.

s : es el número de nodos intra-cluster en el nivel inferior.

Por otro lado, cada nodo de transición posee capacidad y distancias de coberturas limitadas, es decir, cada uno de estos nodos conoce la topología de la red de sensores inalámbricos para medición avanzada de energía eléctrica. Cada PAD produce un paquete de datos b proporcional al número de saltos y número de sensores inalámbricos asociados a cada diferente conglomerado. Los nodos se despliegan aleatoriamente en un área A de n nodos y se dispone información de sus coordenadas.

De esta manera, el problema de optimización puede ser expresado de la siguiente manera.

$$\min C_2 * \sum_{j=1}^k (s_j - 1) + C_1 * k \quad (4)$$

Sujeto a:

$$C_1 \neq C_2, \quad \forall C \in \mathbb{R}^+; \forall C > 0; C_1 \gg C_2. \quad (5)$$

$$\sum_{s,k \in n} (s - 1) + k = n, \quad \forall s, k \in n; \forall n \in A(n) \quad (6)$$

$$\sum_{SI \in A(n)} SI = Z_{i,j}, \quad \forall Z \in A(n) \quad (7)$$

$$\sum_{SI \in A(n)} SI = X_{i,j}, \quad \forall X \in A(n) \quad (8)$$

$$\sum_{s \in S} s \leq m, \forall s \in A(n); \forall m > 1. \quad (9)$$

$$X_{i,j} = \sum_{r_{ni} \in r_{db}, r_{ds}} r_{ni} \leq r_{db}, \quad \forall r_{db} \ll r_{ds} \quad (10)$$

$$Z_{i,j} = \sum_{r_{ns} \in r_{ds}} r_{ns} \leq r_{ds}, \quad \forall r_{ds} \gg r_{db} \quad (11)$$

La ecuación (4) corresponde a la función objetivo, la cual, minimiza el costo de la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica gracias a un óptimo despliegue de los sensores inteligentes y planeación adecuada. La ecuación (5) afirma que necesariamente existe dos tipos de costos, los mismos que se relacionan a las tecnologías a aplicar en cada nivel, además pone de manifiesto que, el C_1 es mucho más caro que el C_2 . La ecuación (6) es una restricción de verificación, en la que, debe cumplirse que la suma de enlaces en el nivel inferior más los nodos de transición PAD del nivel superior no supere el número total de sensores inalámbricos desplegados en el área finita. Por lo tanto, de esta manera se garantiza que no exista loops, es decir, verifica que un nodo incidente no se conecte con un nodo de transición consigo mismo. Las ecuaciones (7) y (8) posibilita a que cualquier nodo del escenario sea un PAD o un nodo incidente respectivamente, con la finalidad de poder ejecutar varias iteraciones en busca de la respuesta óptima global.

La restricción de capacidad, de la ecuación (9), limita el número de nodos intra-clúster, estableciendo que únicamente puede ser igual o menor que los nodos máximos permitidos m . En las ecuaciones (10) y (11) se da lugar a la existencia de los niveles superior e inferior que estarán restringidos por las distancias de cobertura, es decir, el rango máximo permitido, tanto en el nivel inferior

como en el superior, para poder formar los enlaces de comunicación inalámbrica.

3.1 Algoritmo Algoritmo-Mínimo árbol de expansión.

En el algoritmo, Algoritmo 1, se manifiesta la variante de PRIM empleado en el presente artículo. Mediante la modificación de este algoritmo se construye los conglomerados del nivel inferior considerando las restricciones de capacidad y cobertura propias de este nivel. En el algoritmo 2 se da solución al despliegue de sensores inalámbricos mediante redes heterogéneas. Cabe mencionar que los enrutamientos se los hace con criterios de mínimas distancias, mediante el algoritmo de Dijkstra.

1) Algoritmo 1: Algoritmo-Mínimo árbol de expansión

Algoritmo 1 – Mínimo árbol de expansión basado en PRIM

Paso 1:

Definir variables de entrada:

$m \rightarrow$ número máximo permitido de nodos para la formación de los conglomerados.

$r_{ds} \rightarrow$ distancia máxima permitida intra-cluster (nivel inferior).

$x_s \rightarrow$ vector de coordenadas en x de sensores inalámbricos.

$y_s \rightarrow$ vector de coordenadas en y de sensores inalámbricos.

$w \rightarrow$ número máximo de saltos permitido.

$s \rightarrow$ cantidad de nodos intra-cluster.

$Nhop \rightarrow$ número de saltos entre nodos incidentes.

Crear vector *usados*, *tmp*

Paso 2:

Calcular: $dist_{i,j}$ usando (1)

Calcular: $n = length(x_s)$

Paso 3:

While $s \leq m$ && $Nhop \leq w$ **do**

flag $\rightarrow 1$

While flag = 1 **do**

For $i \rightarrow 1:n$

For $j \rightarrow 1:p$

If $Nhop \leq w$ && $r_{ni} \leq r_{ds}$

$dist_{i,j} \leftarrow inf$

End if

End For

End For

If encuentra mínima distancia.
 $usados \leftarrow$ almacena los nodos correspondientes a cada clúster
 $tmp \leftarrow usados$
else
 $flag \rightarrow 0$
End if
End While
End while
Paso 4:
Devuelve vector de cada grupo:
Return tmp
Paso 5:
Enrutamiento bajo criterio de distancias mínimas con el algoritmo de dijkstra

2) Algoritmo de despliegue óptimo de sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica.

Algoritmo de óptimo despliegue de Sensores Inalámbricos.

Paso 1:
Definir variables de entrada:
 $r_{db} \rightarrow$ distancia máxima permitida desde un PAD hacia la EB (nivel superior).
 $r_{ds} \rightarrow$ distancia máxima permitida intra-cluster (nivel inferior).
 $x_s \rightarrow$ vector de coordenadas en x de sensores inalámbricos.
 $y_s \rightarrow$ vector de coordenadas en y de sensores inalámbricos.
 $EB_x \rightarrow$ vector de coordenadas en x de EB disponibles en el área.
 $EB_y \rightarrow$ vector de coordenadas en y de EB disponibles en el área.
 $encuesta \rightarrow$ almacena la cantidad de nodos usados.
 $G \rightarrow$ matriz de conectividad.
Paso 2:
Crear vectores de las coordenadas en x y y de los sensores inalámbricos y las estaciones base:
 $x = [x_s \ EB_x]$
 $y = [y_s \ EB_y]$
Paso 3:
Calcular $dist_{i,j}$ usando (1)
Paso 4:
Extraer vector de conglomerados usando algoritmo (1)
Paso 5:
Enlaces en el nivel inferior:
While $encuesta \leq n$ **do**
If $indice \neq 1$
 $indice(tmp) = 1$
 $encuesta = sum(sum(indice))$
End if
For $k \rightarrow$ length(tmp)
For $j \rightarrow$ length(tmp)
Activar enlaces.
 $G(tmp(k), tmp(j)) = 1$
 $G(tmp(j), tmp(k)) = 1$
End for
End for

End while
Paso 6:
Selecciona el nodo de transición idóneo de cada grupo:
 $PAD_x \leftarrow$ coordenada en x del nodo de transición.
 $PAD_y \leftarrow$ coordenada en y del nodo de transición.
Paso 7:
Enlaces en el nivel superior:
For $i \leftarrow 1 : \text{length}(PAD_x)$
 $G(i, EB) = 1$
 $G(EB, i) = 1$
If $dist(i, EB) > r_{db}$
 $G(i, EB) = 0$
 $G(EB, i) = 0$
End if
End for

4. Análisis de resultados

El método propuesto para un óptimo despliegue de SI se ha simulado bajo diferentes criterios en un área específica, tales como, diferentes densidades de SI y densidades fijas. En ambos casos se consideró los siguientes escenarios: variación de densidades de EB, variación de capacidades y coberturas, y exploraciones randómicas en busca de soluciones óptimas globales. En la Tabla 1., se puede identificar los parámetros iniciales con el que haremos la exposición de los resultados.

Descripción	Variables	Valores iniciales
Cobertura	r_{db}	1,5
	r_{ds}	0,5
Ubicación de EB	EB_x	[0,75 2,25]
	EB_y	[1,5 1,5]
Exploraciones	# iteraciones	100
Densidad	# de SI	512
Capacidad	Capacidad	23

Tabla 1. Parámetros iniciales de ingreso.

La creación de clústeres en RSIs se realiza tomando en cuenta la proximidad medida entre los SI, medidos a través de la señal de radio frecuencia que emiten. Por lo tanto, emplearemos una distancia máxima de cobertura de 1.5 y 0.5 unidades de distancias máximas permitidas para los enlaces celular y WiFi respetivamente (ver Tabla 1). Al disponer de las

coordenadas de los SI se podrá desplegar dentro de un escenario finito los sensores inalámbricos.

En la Figura 4, se puede verificar las distancias euclidianas calculadas mediante la ecuación 1, para una muestra de 32 nodos que, dependiendo de sus longitudes se representan mediante diferentes tonos de colores.

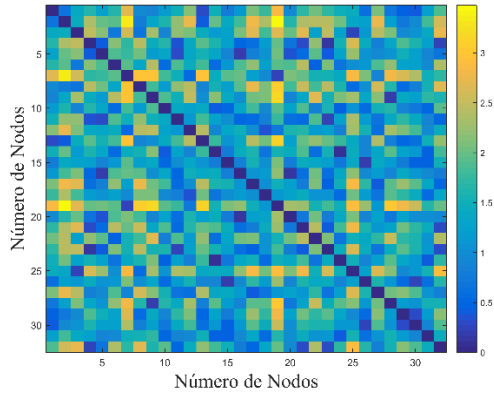


Figura 4. Matriz de distancias representativa desde un PAD hacia la EB en una densidad de 32 SI.

Esta matriz nos permite identificar un escenario definido por una cantidad finita de nodos, el cual muestra las diferentes longitudes entre los nodos. La diagonal de esta matriz es cero, puesto que, representan las distancias de los nodos respecto a sí mismos, es decir, no puede existir una longitud l entre un mismo nodo.

Al construir árboles de decisión sujetos a restricciones estos se forman por naturaleza balanceados, es decir, dentro de un clúster ningún nodo puede superar la distancia máxima permitida y el número de nodos no puede ser mayor que lo dispuesto en los requerimientos de la red, por lo tanto, el grafo se construirá dependiendo a las características dispuestas en la infraestructura.

En la Figura 5, se puede apreciar la matriz de adyacencia, dicha gráfica proporciona información acerca de la

cantidad de nodos enlazados y la topología que, mediante el algoritmo de dijkstra construirá. Una matriz de adyacencia es una matriz cuadrada, la misma que, se utiliza para representar relaciones binarias, dicho de otro modo, esta matriz está llena de 0 y 1. Dónde, 0 representa la no conectividad, es decir, la inexistencia de una arista o enlace y el 1 activa un enlace ya sea celular o WiFi, dependiendo en qué nivel se encuentre. En esta matriz se representan los nodos del escenario y se los identifica mediante sus filas y columnas.

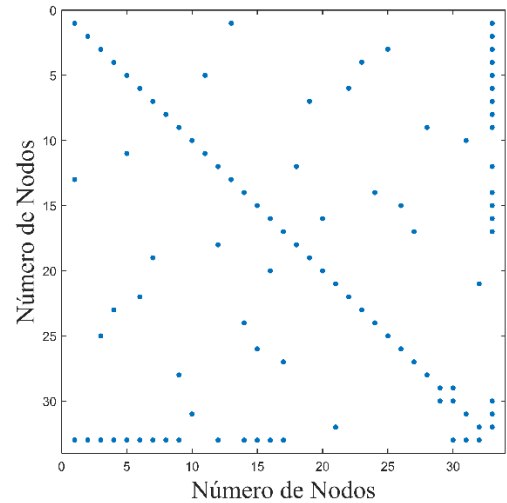


Figura 5. Representación gráfica de la matriz binaria de conectividad o adyacencia para una densidad de SI de 32.

Por lo tanto, las columnas de la matriz representan las aristas del grafo, mientras que las filas representan los distintos nodos. Por cada nodo, que se une mediante una arista, se coloca un 1 en el lugar que corresponda, y el resto se coloca 0. De esta manera, en la Figura 5, se encuentra representado los vértices (nodos) y las aristas (enlaces) que construyen el árbol de decisión.

Por lo tanto, la matriz de distancias (ver Figura 4) contiene la relación de distancias que existen entre cada uno de los nodos y las EB. Por otro lado, la matriz de adyacencia (ver Figura 5) es

una matriz binaria que contiene la información de los vértices y aristas de la solución del problema.

Para demostrar el buen funcionamiento del algoritmo se llevaron a cabo varias iteraciones. En la Figura 6, el algoritmo fue configurado para que ejecutara 100 exploraciones dentro de un escenario con densidad de 512 SI fija y una capacidad máxima de 23 nodos por cada conglomerado. En cada iteración el algoritmo encuentra diferentes conglomerados (observando las restricciones a las cuales fue sujeto) con sus respectivos nodos de transición, de esta manera, se prueba que el algoritmo propuesto proporciona soluciones óptimas globales y que además es un algoritmo adaptable a las condiciones, lo que quiere decir que, cambia su comportamiento de acuerdo a las diferentes exigencias de la aplicación y la red.

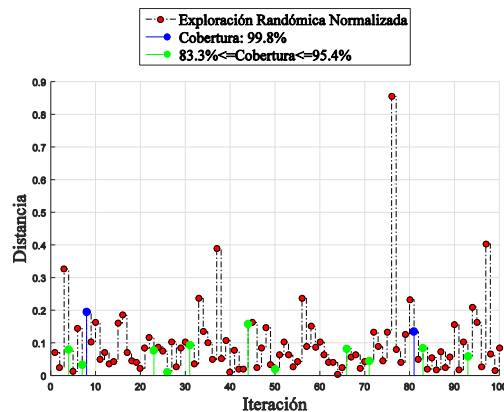


Figura 6. Solución global mediante diferentes exploraciones.

En la figura 6, en el eje coordenado de las x se representa el número de iteraciones, que para el caso es 100, y en el eje coordenado y se plasma la distancia. La distancia corresponde a los diferentes puntos de partida (aleatoriedad normalizada) que el algoritmo ejecuta para encontrar la mejor solución en el óptimo despliegue de sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica.

De esta manera, en la Figura 6, se puede identificar en color azul la mejor solución, que para el caso encontró 2 soluciones óptimas con los parámetros ingresados en la Tabla 1. La primera respuesta óptima, el algoritmo la encuentra en la iteración 8 (ver Figura 6) partiendo de una x distancia, mientras que la segunda respuesta óptima parte de una distancia y y encuentra la mejor infraestructura en la iteración 81. El porcentaje de cobertura, en los dos casos, alcanza 99.8%, lo que significa que, mediante la exploración en 100 escenarios diferentes, solo faltó enlazar 1 nodo incidente como se presenta en la Figura 7, de esta manera, aquel nodo no cubierto, ya sea por, la cobertura máxima de la EB más cercana, capacidad máxima de los clústeres, número de saltos permitidos esta se deberá enlazar mediante tecnología celular, logrando con esto cubrir al 100% de cobertura al área finita donde se despliega sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica. Otro aspecto de mucha importancia es que, aquel nodo que queda sin enlaces WiFi y únicamente con celular, este nodo servirá como foco de cobertura que, posteriormente si se añaden SI por esa zona, resultara sencillo proporcionar cobertura a aquellos nuevos usuarios. Por lo tanto, no depende de la longitud de la distancia de arranque, sino que, depende de las topologías que se forman en cada exploración observando cada una de las restricciones a las que el algoritmo está sujeto.

Las agrupaciones ayudan a resolver algunas limitaciones, como reducir el consumo de energía en los dispositivos, facilita la recolección de datos detectados, maximiza la ejecución del proceso de enrutamiento y permite la escalabilidad. Como se había mencionado, una red de sensores

inalámbricos puede representarse mediante un gráfico $G = (V, E)$, donde los vértices V representan los sensores y el conjunto de aristas E los enlaces. En la Figura 7, se puede apreciar claramente los dos niveles propuestos en este documento. En el nivel superior se ubican los PADs y las EB representados con circunferencias color verde y mediante triángulos amarillos respectivamente.

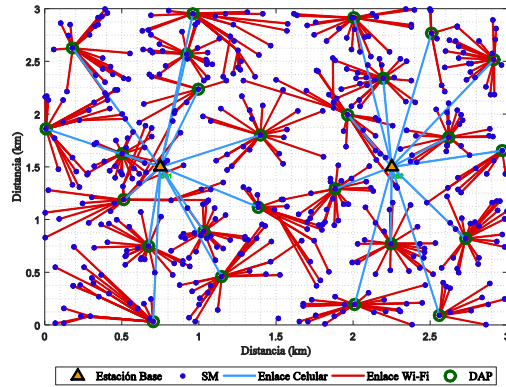


Figura 7. Despliegue óptimo de SI para MEE.

Los PADs se enlazan a las EB mediante enlaces celulares representado de color celeste. En el nivel inferior se identifican a los PADs (puntos azules con circunferencia verde a su alrededor) y sus respectivos nodos incidentes representados únicamente con puntos azules (ver Figura 8). El enlace, en el nivel inferior, se lleva a cabo mediante tecnología WiFi representada de color rojo (ver Figura 8).

Por lo tanto, la Figura 7 representa la topología tipo árbol óptima para el despliegue adecuado de PADs al menor costo garantizando confiabilidad, escalabilidad, mejoramiento en la vida útil de la red y balance del tráfico de información en el sistema con los criterios de partida de la Tabla 1.

En la Figura 8, se obtiene la métrica de uso de enlaces, los mismos que han

sido ejecutados para diferentes capacidades y diferentes densidades de SI. Los escenarios que se consideran dependen de las capacidades en cada conglomerado; las capacidades exploradas son: 3, 6, 12, 15, 18 y 21. En cada escenario se dispone de una densidad de 32, 64, 128, 256 y 512.

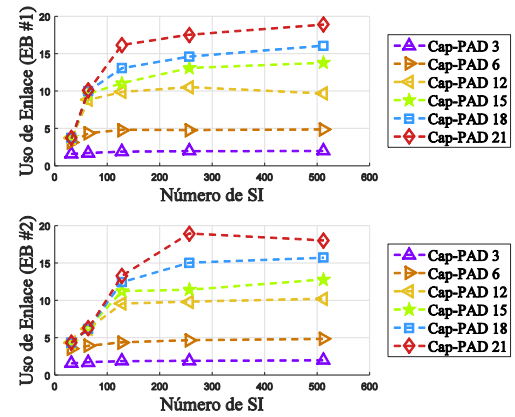


Figura 8. Uso de enlace en diferentes densidades de SMs

Además, en la Figura 8, se puede apreciar que, a medida que la densidad de nodos aumenta también lo hace el número de enlaces. Por otro lado, el comportamiento de la gráfica de la EB #1 y EB #2 son muy similares lo que una vez más se pone en evidencia la construcción de un grafo balanceado.

Al referirnos a densidades bajas de SI hacemos mención a zonas rurales, que en la Figura 8 va desde 32 a 64 nodos, lo que supone que tenemos gran dispersión de los SI. En densidades de 120 hablamos de zonas suburbanas y desde 256 hasta 512 a zonas urbanas.

En densidades de 256 a 512, donde las distancias entre nodos intra-clúster son mínimas, el uso de enlaces tiende a estabilizarse sin importar la capacidad y esto responde únicamente a que, dentro de una red vecindaria se dispone de conglomerados claramente definidos evitando la dispersión que a la larga se traduce a pérdidas de

propagación en el espacio libre de la señal de radio frecuencia (FSL).

Se efectuó varios análisis mediante la exploración con distintas densidades de

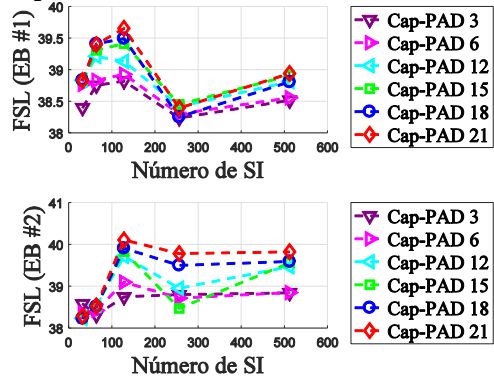


Figura 9. Pérdidas por propagación en el espacio libre calculados a una frecuencia de 2.4 GHz.

sensores inalámbricos. Por lo tanto, mediante la Figura 9 se puede verificar que, a medida que la densidad de SI aumenta, las pérdidas por propagación en el espacio libre FSL disminuye. Este efecto ocurre, puesto que cuando exploramos en densidades altas de SI, hablaríamos de zonas residenciales dónde la densidad poblacional es considerable, por lo que supone el manejo de distancias mínimas debido a la cercanía del vecindario. Por otro lado, cuando las densidades de los de SI son menores, geográficamente nos ubicaremos en zonas suburbanas o rurales, lo que nos lleva a disponer de mayores distancias y por ende mayores pérdidas por FSL.

Otra información importante que se obtiene de la Figura 9 es que el FSL no depende de la capacidad de los PADs, sino que depende de las distancias y la frecuencia del espectro radioeléctrico, que para el caso de cálculo en la figura 9 es de 2.4 GHz. Este criterio se aplica en los dos niveles (inferior y superior).

El costo total de la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica está dado por la sumatoria de los costos

de enlaces WiFi y la de los enlaces celular.

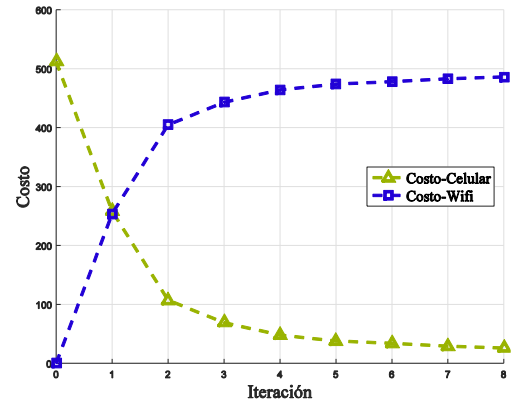


Figura 10. Comportamiento del costo en función del uso de enlace.

En la Figura 10, se pone de manifiesto el comportamiento de los costos a medida que se logra combinar tecnologías inalámbricas, que para el caso de estudio son: WiFi y celular. En la iteración 0 (ver Figura 10) se expresa el 100% de uso de red celular y 0% de uso de red WiFi lo que hace que sea inviable llevar a cabo un proyecto de implementación de medición inteligente de energía eléctrica. A medida que se elimina los enlaces directos mediante tecnología celular aumenta los enlaces WiFi, esta combinación de tecnologías nos permite reducir los costos de implementación de infraestructuras de medición avanzada de energía eléctrica. En la gráfica de tendencia de la Figura 10, se puede verificar que, a medida que el uso de enlaces celulares disminuye, paralelamente el uso de tecnología WiFi aumenta gradualmente, debido a que si se elimina enlaces celular se debe proporcionar enlaces WiFi para satisfacer el mínimo de cobertura aceptable dentro de infraestructuras de medición avanzada, lo que hace que el costo de implementación vaya disminuyendo gracias a la optimización del uso de enlaces celulares, que como ya se había analizado son mucho más

costosos que enlaces con tecnología WiFi.

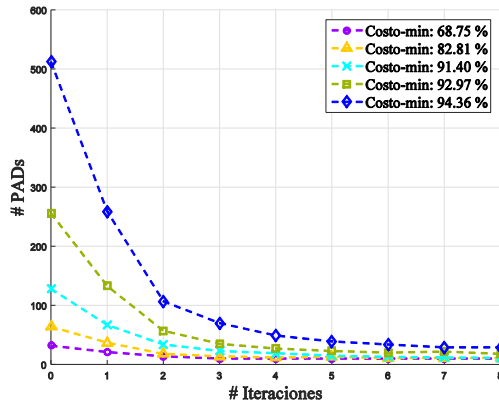


Figura 11. Comportamiento del costo en función de diferentes densidades de SI.

Se realizó varios ensayos para poder determinar porcentajes máximos a los que se puede reducir el uso de tecnologías inalámbricas celular para minimizar costos de la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica. En la Figura 11, se ensayó con diferentes densidades de SI, de lo cual se aprecia, que a medida que la densidad de SI es menor (zona rural), menor es el porcentaje posible para minimizar el uso de enlace celular, sin embargo, el algoritmo busca el óptimo resultado reduciendo al máximo el uso de tecnología celular. Para el caso de estudio de 32 SI desplegados se obtiene un 68.75 %. Por lo tanto, queda demostrado la efectividad, confiabilidad, funcionamiento y la capacidad que brinda el algoritmo propuesto para reducir el uso de enlaces inalámbricos costosos para remplazarlos por tecnologías más económicas como lo es las redes WiFi. De esta manera que evidenciado que, el algoritmo siempre logra reducir los costos de implementación de una infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica observando criterios de capacidad y cobertura, pero además de confiabilidad y escalabilidad.

5. Conclusiones

El algoritmo planteado permite desplegar el número necesario de sensores inalámbricos para medición de energía eléctrica con la finalidad de proporcionar cobertura a un número n de SI, además optimiza el uso de enlaces proporcionando topologías tipo árbol, garantizando la prolongación de vida útil del sistema y la confiabilidad del mismo. Una característica fundamental del modelo propuesto es que se adapta a las condiciones de la red inalámbrica requerida.

El algoritmo permite explorar, en busca de la solución óptima global, varios escenarios dentro de la misma área de interés, modificando los clústeres. Cabe mencionar que el criterio de parada del algoritmo se da por capacidad, lo que pone de manifiesto que el algoritmo es finito y, por último, todo elemento que no logre unirse mediante enlace WiFi este lo hará mediante tecnología celular logrando así proporcionar el 100% de cobertura al área de interés.

Al modificar los clústeres el algoritmo modifica la topología y almacena las matrices de conectividad de cada nivel (superior e inferior) para presentar al final la solución óptima global. Además, este modelo permite minimizar los costos de implementación de la infraestructura minimizando el uso de enlaces de mayor costo.

La simulación del algoritmo ha permitido analizar el uso de enlaces requeridos en los diferentes niveles de la infraestructura híbrida propuesta, logrando con ello determinar la mínima cantidad de PADs a emplearse dentro de un área finita. Además, el modelo admite parámetros reales tales como: capacidad y cobertura de cada uno de los sensores inalámbricos disponibles

para la construcción de la infraestructura inalámbrica de medición de energía eléctrica.

6. Referencias

- [1] S. Bera, S. Misra, and M. S. Obaidat, "Energy-efficient smart metering for green smart grid communication," *2014 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2014*, pp. 2466–2471, 2014.
- [2] 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.
- [3] F. Salvadori, C. S. Gehrke, A. C. De Oliveira, M. De Campos, and P. S. Sausen, "Smart grid infrastructure using a hybrid network architecture," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1630–1639, 2013.
- [4] G. A. Montoya and Y. Donoso, "Energy load balancing strategy to extend lifetime in wireless sensor networks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 17, pp. 395–402, 2013.
- [5] H. Yousefi, M. Malekimajd, M. Ashouri, and A. Movaghar, "Fast Aggregation Scheduling in Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 3402–3414, 2015.
- [6] G. Grigoros and F. Scarlatache, "Use of data from smart meters in optimal operation of distribution systems," *Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip.*, pp. 179–184, 2014.
- [7] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, "Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors," *Comput. Networks*, vol. 44, no. 1, pp. 1–16, 2004.
- [8] F. Aalamifar, G. N. Shirazi, M. Noori, and L. Lampe, "Cost-efficient data aggregation point placement for advanced metering infrastructure," *2014 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2014*, pp. 344–349, 2015.
- [9] F. Pabón and E. Inga, "State of Art , Meter Data Management System Using Compressed Sensing for AMI Based on Wavelet," vol. 13, no. 12, pp. 3774–3780, 2015.
- [10] D. Pérez, E. Inga, and R. Hincapié, "Optimal Sizing of a Network for Smart Metering," vol. 14, no. 5, pp. 2114–2119, 2016.
- [11] R. Camacho and E. Inga, "State of Art, Cognitive Radio for Virtual Network Operator on Advanced Metering Infrastructure," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2574–2579, 2015.
- [12] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, "Optimum deployment of FiWi Networks using wireless sensors based on Universal Data Aggregation Points," *2015 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2015 - Conf. Proc.*, 2015.
- [13] O. D. Incel, A. Ghosh, B. Krishnamachari, and K. Chintalapudi, "Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 1, pp. 86–99, 2012.
- [14] R. Xie and X. Jia, "Transmission Efficient Clustering Method for Wireless Sensor Networks using Compressive Sensing," pp. 1–11, 2013.
- [15] N. Ghosh and I. Banerjee, "An energy-efficient path determination strategy for mobile data collectors in wireless sensor network," *Comput. Electr. Eng.*, 2015.
- [16] A. Ghosh, Ö. D. Incel, V. S. A. Kumar, and B. Krishnamachari, "Multichannel Scheduling and Spanning Trees: Throughput–Delay Tradeoff for Fast Data Collection in Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 19, no. 6, pp. 1731–1744, 2011.
- [17] E. Inga-Ortega, A. Peralta-Sevilla, R. C. Hincapié, F. Amaya, and I. Tafur Monroy, "Optimal dimensioning of FiWi networks over advanced metering infrastructure for the smart grid," *2015 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. ISGT LATAM 2015*, pp. 30–35, 2016.
- [18] C. Ganán, E. Inga, and R. Hincapié, "Óptimo despliegue y enrutamiento de UDAP para infraestructura de medición avanzada basada en el algoritmo MST Optimal deployment and routing geographic of UDAP for advanced metering infrastructure based on MST algorithm," *INGENIARE*, vol. 25, no. 1, pp. 106–115, 2017.
- [19] Q. Mamun, "A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 11, pp. 14887–913, 2012.
- [20] B. Wang and J. S. Baras, "Minimizing aggregation latency under the physical interference model in Wireless Sensor Networks," *2012 IEEE 3rd Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2012*, pp. 19–24, 2012.
- [21] C. Y. Lee, "Cell planning with capacity expansion in mobile communications: a tabu search approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 5, pp. 1678–1691, 2000.
- [22] S. Lee, B. Kim, M. K. Oh, Y. Jeon, and S. Choi, "Implementation of IEEE 802.15.4g wireless communication platform for smart utility service," *Proc. 2013 IEEE 3rd Int. Conf. Consum. Electron. - Berlin, ICCE-Berlin 2013*, pp. 287–289, 2013.
- [23] T. Nadu, C. Deepa, and B. Latha, "HHCS : Hybrid Hierarchical Cluster Based Secure routing protocol for wireless sensor networks," *Int. Conf. Inf. Commun. Embed. Syst.*, no. 978, pp. 0–5, 2014.
- [24] G. Barai and K. Raahemifar, "Optimization

- of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2014.
- [25] B. Karimi, V. Namboodiri, and M. Jadliwala, “Scalable Meter Data Collection in Smart Grids Through Message Concatenation,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1697–1706, 2015.
- [26] S. Chen, M. Huang, S. Tang, and Y. Wang, “Capacity of data collection in arbitrary wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 52–60, 2012.
- [27] P. Li, S. Guo, and Z. Cheng, “Joint optimization of electricity and communication cost for meter data collection in smart grid,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 297–306, 2013.
- [28] B. Barekatain, S. Dehghani, and M. Pourzaferani, “An Energy-Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on New Combination of Genetic Algorithm & k-means,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 72, pp. 552–560, 2015.
- [29] V. P. Mhatre, S. Member, C. Rosenberg, S. Member, D. Kofman, and R. Mazumdar, “A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 4–15, 2005.
- [30] G. Wang, H. Zhu, H. Dai, L. Wu, and B. Xiong, “The Clustering Algorithm of Wireless Sensor Networks Based on Multi-hop between Clusters,” *2009 WRI World Congr. Comput. Sci. Inf. Eng.*, pp. 177–181, 2009.
- [31] X.-Y. Li, W.-Z. Song, and Y. Wang, “Localized topology control for heterogeneous wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 129–153, 2006.
- [32] A. Peralta Sevilla, E. Inga Ortega, and R. Hincapié, “FiWi network planning for smart metering based on multistage stochastic programming,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3838–3843, 2015.
- [33] C. Velásquez-Villada and Y. Donoso, “Multipath routing network management protocol for resilient and energy efficient wireless sensor networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 17, pp. 387–394, 2013.
- [34] E. Inga and R. Hincapié, “Matched Channel Allocation for Advanced Metering Infrastructure based on Cognitive Mobile Virtual Network Operator,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1780–1785, 2016.
- [35] J. Inga, E. Inga, R. Hincapié, and C. Gómez, “Evaluación de la Infraestructura de Medición y la Respuesta de la Demanda,” *Rev. Técnica Energía*, no. 12, pp. 262–269, 2016.
- [36] M. S. Nassr, J. Jun, S. J. Eidenbenz, A. A. Hansson, and A. M. Mielke, “Scalable and reliable sensor network routing: Performance study from field deployment,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 670–678, 2007.
- [37] C. Zhong, Y. Mo, J. Zhao, C. Lin, and X. Lu, “Secure clustering and reliable multi-path route discovering in wireless sensor networks,” *Proc. - Int. Symp. Parallel Archit. Algorithms Program. PAAP*, no. 2011, pp. 130–134, 2014.
- [38] T. Dong, “A Clustering Routing Algorithm Based on Reliability in Wireless Sensor Network,” *Cyber-Enabled Distrib. Comput. Knowl. Discov. (CyberC)*, 2012 *Int. Conf.*, pp. 389–392, 2012.
- [39] E. Inga, S. Céspedes, R. Hincapié, and C. Cesar, “Scalable Route Map for Advanced Metering Infrastructure Based on Optimal Routing of Wireless Heterogeneous Networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. Volume: 24, no. April, pp. 26–33, 2017.
- [40] J. Chen and N. Wang, “Efficient Cluster Head Selection Methods for Wireless Sensor Networks,” *Sensors (Peterborough, NH)*, vol. 5, no. 8, pp. 964–970, 2010.
- [41] D. Westhoff, J. Girao, and M. Acharya, “Concealed data aggregation for reverse multicast traffic in sensor networks: Encryption, key distribution, and routing adaptation,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 10, pp. 1417–1431, 2006.
- [42] K. Papithasri, “Efficient multihop dual data upload clustering based mobile data collection in wireless sensor network,” 2016.
- [43] G. R. Barai, S. Krishnan, and B. Venkatesh, “Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - A review,” *2015 IEEE Electr. Power Energy Conf. Smarter Resilient Power Syst. EPEC 2015*, pp. 138–145, 2016.
- [44] R. Q. Hu, J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, “Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid,” vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [45] B. Karimi, V. Namboodiri, and M. Jadliwala, “On the scalable collection of metering data in smart grids through message concatenation,” *2013 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2013*, pp. 318–323, 2013.
- [46] G. Castignani, J. Monetti, N. Montavont, A. Arcia-Moret, R. Frank, and T. Engel, “A study of urban IEEE 802.11 hotspot networks: Towards a community access network,” *IFIP Wirel. Days*, 2013.
- [47] M. Levorato and U. Mitra, “Optimal Allocation of Heterogeneous Smartgrid Traffic to Heterogeneous Networks,” *Wirel. Networks*, pp. 132–137, 2011.
- [48] M. Yu, K. Leung, and A. Malvankar, “A dynamic clustering and energy efficient routing technique for sensor networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 8,

- pp. 3069–3079, 2007.
- [49] A. Boukerche, *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, vol. 6. Ottawa, 2009.
 - [50] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, N. Sabor, and S. Sasaki, “Coverage maximization in mobile Wireless Sensor Networks utilizing immune node deployment algorithm,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2014.
 - [51] M. C. Vuran, Ö. B. Akan, and I. F. Akyildiz, “Spatio-temporal correlation: Theory and applications for wireless sensor networks,” *Comput. Networks*, vol. 45, no. 3, pp. 245–259, 2004.
 - [52] S. Singh, R. Srivastava, V. Kumar, and S. Agarwal, “An approximate algorithm for degree constraint minimum spanning tree,” *2010 Int. Conf. Comput. Commun. Technol. ICCCT-2010*, no. 3, pp. 687–692, 2010.