

**PLANEACIÓN ÓPTIMA PARA DESPLIEGUE DE REDES
INALÁMBRICAS HETEROGÉNEAS EN LA INFRAESTRUCTURA
DE MEDICIÓN AVANZADA REQUERIDA POR SMART GRID**

Esteban Mauricio Inga Ortega

Director

Roberto Carlos Hincapié Reyes, PhD



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE FORMACIÓN AVANZADA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA TELECOMUNICACIONES
MEDELLÍN
2017

**PLANEACIÓN ÓPTIMA PARA DESPLIEGUE DE REDES
INALÁMBRICAS HETEROGÉNEAS EN LA INFRAESTRUCTURA
DE MEDICIÓN AVANZADA REQUERIDA POR SMART GRID**

Esteban Mauricio Inga Ortega

Trabajo de grado para optar al título de Doctor en Ingeniería
Área Telecomunicaciones

Director

Roberto Carlos Hincapié Reyes, PhD



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE FORMACIÓN AVANZADA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA TELECOMUNICACIONES
MEDELLÍN
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

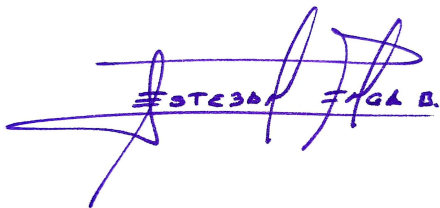
Declaración de originalidad

Medellín, 8 de noviembre de 2017.

Yo, Esteban Mauricio Inga Ortega

“Declaro que esta tesis de grado no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”, Art 18 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma



ESTEBAN INGA B.

“Dedicado a Mary, Juanes y Sebas”

Acknowledgements

This work has been performed thanks by the blessing of God, who has given me discernment, wisdom, strength and health.

This work has been thanks to the support and guidance of Doctor. Roberto Carlos Hincapié Reyes. Thank you for your friendship, motivation and support.

Thanks to Doctor. Sandra Céspedes and Doctor. Idi Isaac for their contribution in the research projects generated from this work.

Thanks also to Doctor Andrés Navarro for his contribution and revision of the thesis.

Thanks to the Universidad Pontificia Bolivariana for its academic excellence and to the Universidad Politécnica Salesiana that generated the financial support to my doctoral studies.

Thanks to my mother Sarita for the values transmitted from my childhood and all the effort made for my education, thanks to my brother and partner Juan for their unconditional support, thanks to my cousin Andres and his family. Thanks to my wife and children for their love and warmth, that I was given in these years of study, a treasure found in my family.

Índice general

Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	12
Abstract	13
1. Alcance del Proyecto	14
1.1. Descripción general del problema	14
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Contribuciones	18
1.4. Organización del manuscrito	20
2. Estado del Arte de AMI	21
2.1. Introducción	21
2.2. Infraestructura de Medición Avanzada en Redes Eléctricas Inteli- gentes	21
2.2.1. Aspectos Mundiales	24
2.2.2. Aspectos Regionales	27
2.2.3. Aspectos Locales	28
3. Red de comunicación inalámbrica heterogénea para AMI	34
3.1. Introducción	34
3.2. Redes Inalámbricas en AMI	34
4. Formulación del Problema	50
4.1. Introducción	50
4.2. Problema: Asignación de Recursos	51

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	8
4.3. Problema: Despliegue de Redes Inalámbricas Heterogéneas	56
4.3.1. Óptimo Enrutamiento de Redes WHN	56
4.3.2. Problema de flujo de múltiples recursos	60
5. Análisis y resultados	76
5.1. Introducción	76
5.2. Resultados Generales	77
5.2.1. Problema de Asignación de Recursos	77
5.2.2. Problema Despliegue Óptimo de Redes Inalámbricas He- terogéneas	86
5.2.3. Problema de flujo de múltiples recursos	97
6. Conclusiones	117
7. Glosario	122
Referencias	126

Índice de Figuras

1.1. Infraestructura de Medición Avanzada usando Redes Inalámbricas Heterogéneas - Fuente Autor	17
2.1. Etapas de Smart grid - AMI - Primera Generación Fuente The Advanced Smart Grid- Edge Power Driving Sustainability, Página 8 [1]; Adaptación: Autor	23
2.2. Proyectos de AMI-AMR en el Mundo. Fuente Google Maps	25
2.3. Inicios de AMR – Guayaquil-Ecuador – zonificación geográfica de las tecnologías AMI. Fuente Arconel	32
3.1. Consumo de Energía (W) de las tecnologías inalámbricas por Smart Meter (SM) Fuente Microwaves & RF - Febrero 2015 [2]	36
3.2. Arquitectura AMI - Red Celular. Fuente Autor	39
3.3. Infraestructura de Medición Avanzada con Red Celular Fuente Autor	41
3.4. Infraestructura de medición avanzada. Fuente Autor	45
4.1. Etapas del proyecto de investigación. Fuente Autor	51
4.2. Modelo para asignación de canales en AMI. Fuente Autor	54
4.3. Ocupación y uso del enlace basado en generación de columnas. Fuente Autor	62
4.4. Multigrafo - Generador de Columnas Fuente Autor	65
5.1. Relación N_{ra} Canales Aleatorios Vs N_r Canales Reservados - $N_{ra} = 7, N_r = 8, N_f = 10, M = 250, T = 40$. Fuente Autor	79
5.2. Período/Probabilidad de Transmisión vs Número de SMs - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ - Fuente Autor	80
5.3. Probabilidad de Transmisión vs Número de SMs - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ Fuente Autor	81

5.4. Rendimiento (Throughput) vs Tiempo - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ Fuente Autor	82
5.5. Período T para lectura de SMs - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ Fuente Autor	83
5.6. Relación del número de SMs, T período de tiempo y probabilidad de Transmisión - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ Fuente Autor	84
5.7. Relación del número de SMs y Probabilidad de lectura en el tiempo - $N_f=30, N_{ra}=10, N_r=8$ Fuente Autor	85
5.8. UDAP candidatos, SMs y estaciones base. Fuente Autor	88
5.9. Preselección de UDAP usando PRIM modificado y SetCover. Fuente Autor	89
5.10. Óptimo número de UDAP - 100% Cobertura y Capacidad=20. Fuente Autor	90
5.11. Conglomerados de SMs usando el mínimo número de UDAPs. Fuente Autor	91
5.12. Promedio de cargabilidad de UDAPs. Fuente Autor	92
5.13. Porcentaje (%) de cobertura de SMs. Fuente Autor	93
5.14. Pre-selección de UDAP basado en Setcover - Greedy. Fuente Autor	95
5.15. Óptimo número de UDAPs. Fuente Autor	96
5.16. Escenario - Despliegue Radial de Medidores Inteligentes $N=64$. Fuente Autor	99
5.17. Escenario - Topología inicial radio Celular (100 metros radio WiFi-40 metros) Fuente Autor	100
5.18. Escenario - Enrutamiento Celular(Verde) - WiFi(Azul) Fuente Autor	101
5.19. Escenario - Uso del Enlace Inalámbrico. Fuente Autor	102
5.20. Escenario - Ocupación del Enlace. Fuente Autor	103
5.21. Escenario - Iteraciones de las etapas de la Heurística CMCF-AMI. Fuente Autor	104
5.22. Escenario - Rendimiento de las etapas de la Heurística CMCF-AMI. Fuente Autor	106
5.23. Escenario - FSL para enlaces inalámbricos con tecnología celular. Fuente Autor	107
5.24. Escenario - FSL para enlaces inalámbricos con tecnología WiFi. Fuente Autor	108
5.25. Escenario - Consumo de energía para la tecnología celular y WiFi. Fuente Autor	110
5.26. Escenario - Cargabilidad de SMs y Número de UDAPs. Fuente Autor	111
5.27. Escenario - Costo representativo en términos de optimización por tipo de tecnología inalámbrica. Fuente Autor	112

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	11
5.28. Escenario - Resumen de enrutamiento WiFi - Celular Fuente Autor	114
5.29. Escenario - Óptimo despliegue de Redes Inalámbricas Heterogé- neas SM=192. Fuente Autor	115

Índice de Tablas

2.1. Resumen de propuestas para desplegar la red de comunicaciones en Advanced Metering Infrastructure (AMI)	33
3.1. Características de las diferentes tecnologías inalámbricas utilizadas para los sistemas de medición inteligente [3].	37
3.2. Funcionalidades y necesidades de las comunicaciones en AMI. Fuente Smart meters and the smart grid: privacy and cybersecurity considerations – Página 130	40
3.3. Resumen del estado del arte de red de comunicaciones inalámbrica que aporta a AMI	49
4.1. Notaciones-VARIABLES	57
4.2. Notaciones CMCF-AMI	61
4.3. Notaciones	67
5.1. Escenario - Iteraciones	104
5.2. Escenario - Revised Simplex (Función Objetivo)	105
5.3. Escenario - Escalabilidad y rendimiento.	105
5.4. Escenario - Path Loss Celular - Cobertura.	107
5.5. Escenario - Path Loss WiFi - Cobertura.	108
5.6. Escenario - Consumo de Energía - Celular & WiFi.	109
5.7. Escenario - Cargabilidad - Costo (SM Celular & SM WiFi).	111
5.8. Escenario - Promedio Uso y Ocupación del Enlace.	113
5.9. Producción científica generada en el proceso Doctoral 2014-2017	116

Abstract

This work presents a scalable route map for the least cost deployment of wireless heterogeneous networks that support traffic from the advance metering infrastructure (AMI). In this case, The first step explore the performance of a common scenario in which a single technology is employed to connect smart meters sending traffic to the utility. Based on simulations with current city maps, we study the coverage provided to smart meters by a cellular and wifi network.

In order to improve the coverage, an optimization model that considers network capacity and range is proposed to determine the optimal location of concentrators to achieve the target coverage of smart meters. According to these preliminary results with a single access technology, this work proposes an evolved network architecture that considers several heterogeneous wireless networks to guarantee the coverage to smart meters with the least use of resources.

This work introduces a heuristic model that involves elements from base stations, universal data aggregation points, number of smart meters, and an optimal routing to achieve the desired connectivity from the group of smart meters. This research employs georeferenced and non georeferenced models to consider characteristics of cities as well as geographical conditions.

Results from the evolved model demonstrate that by combining technologies and employing data aggregation points with optimized localizations, the network is able to achieve the target coverage of smart meters with a reduced cost in terms of technological resources.

Capítulo 1

Alcance del Proyecto

Este capítulo describe los objetivos, justificación y necesidades que generaron el interés por realizar la planeación óptima para despliegue de redes inalámbricas heterogéneas en la infraestructura de medición inteligente (AMI) de energía eléctrica requeridas para una red eléctrica inteligente. Inicialmente se describe el problema, los objetivos y contribuciones científicas en relación a este trabajo.

1.1. Descripción general del problema

En la actualidad las empresas de distribución eléctrica requieren adquirir de forma eficiente y confiable la información del consumo de energía eléctrica de sus diferentes tipos de consumidores como: residenciales, comerciales e industriales. Para esta tarea se dispone de contadores de energía eléctrica a los que se han denominado medidores inteligentes por disponer de un hardware para comunicaciones y control de cortes y reconexiones del suministro de energía.

Para resolver esta necesidad y con el nacimiento del concepto de red eléctrica inteligente, surge la etapa denominada infraestructura de medición avanzada, encargada de proponer una red de comunicaciones dedicada a medición inteligente de energía eléctrica, generando así una oportunidad de investigación para determinar un mapa de ruta a disposición de las empresas eléctricas que facilite desplegar de forma adecuada la red de comunicaciones que dará lugar a la medición inteligente de energía eléctrica.

Esta red de comunicaciones deberá ser capaz de cubrir a los usuarios del

sistema eléctrico para lograr la conectividad entre las empresas de distribución y los consumidores. Pero entonces cabe señalar que dicha red deberá cumplir con ciertos requisitos y/o restricciones propios del despliegue de una red de comunicaciones dedicada. Para esto, se advierte ciertas variables que definen la necesidad de investigar e innovar un solución adecuada que cumpla cobertura de usuarios geográficamente posicionados en zonas urbanas, suburbanas y rurales, determinar de forma automática que tecnología es factible usar al menor costo pero considerando la capacidad de las tecnologías inalámbricas en términos del número de **SM** a ser aglomerados; así como, lograr una planeación escalable de la red de comunicaciones que a más obtiene eficiencia en el sistema de comunicaciones en base al uso adecuado de los recursos y garantizando la conectividad.

Debido a estos antecedentes, se ha tornado común encontrar investigaciones en relación a este particular en los últimos años. En concordancia a esto se han incrementado las investigaciones para reducir los costos en el despliegue de la red de comunicaciones. En la actualidad los diferentes proyectos de despliegue se generan a partir de etapas piloto con diferentes poblaciones y se van adecuando conforme se determina el crecimiento de instalación de un medidor inteligente por parte de la empresa eléctrica que proveerá el servicio. Los proyectos generados de medición inteligente debido al costo de la red de comunicaciones no se han masificado, caso puntual Ecuador, Colombia, Panamá, entre otros y en su defecto se han realizado proyectos pilotos de prueba que resultan ineficientes al momento de escalar la población de medidores inteligentes ya que una única red de comunicaciones se torna inviable por la falta de cobertura o costo.

El presente trabajo, propone inicialmente analizar la posibilidad de reducir costos considerando únicamente la red celular, pero involucrando un operador secundario con una disponibilidad de canales fijos para medición inteligente y un conjunto aleatorio de canales disponibles cuando no son usados por la telefonía celular.

Adicionalmente, la investigación propone el despliegue de una red híbrida, con el uso de una red heterogénea inalámbrica **Wireless Heterogeneous Network (WHN)** que a través de multi-salto permita el intercambio de información entre empresa eléctrica y el usuario consumidor. Se dispondrá de una segunda tecnología inalámbrica a más de la celular y se considera un primer avance con la inclusión de un concentrador de **SM**, en la que se realiza el enrutamiento de la red **WHN** y finalmente el modelo es mejorado con una propuesta que incluye el flujo de información y el porcentaje de uso del enlace inalámbrico, para

ésta etapa el concentrador puede ser considerado al mismo **SM** debido a que su hardware permite incorporar diferentes tarjetas de comunicaciones.

El tema de investigación titulado “Planeación Óptima para despliegue de Redes Inalámbricas Heterogéneas en la Infraestructura de Medición Avanzada requerida por **Smart Grid (SG)**”, hace referencia a la importancia de la comunicación entre las empresas eléctricas y el consumidor; entonces, considera que dentro una red eléctrica inteligente es de gran importancia el cliente del suministro eléctrico [4], ya que es donde se genera información pertinente a las etapas subsiguientes del sistema eléctrico: distribución, sub-transmisión, transmisión, generación.

De esta premisa resulta importante proponer la siguiente pregunta: ¿Es posible proponer un modelo de planeación escalable y eficiente para desplegar redes inalámbricas heterogéneas que permitan el intercambio de información en **AMI**?, ¿Es posible proponer un modelo matemático basado en técnicas de optimización para minimizar el costo por asignación de recursos en la infraestructura de una red inalámbrica heterogénea para **AMI**?

El proyecto de investigación planteado pretende resolver el problema descrito a través del desarrollo de un modelo de planeación de la red de comunicaciones para formar la infraestructura de medición avanzada, basado en un óptimo despliegue considerando variables de cobertura, capacidad (recursos) y costo; modelo que estará sustentado en la generación de un conjunto de algoritmos que permitan satisfacer la necesidad del dimensionamiento de la red de comunicaciones bajo ambientes óptimos o cuasi-óptimos.

El trabajo de investigación doctoral considerará una topología generada a partir de árboles de enrutamiento colocados en capas a manera de multinivel con el flujo de los múltiples enlaces entre los medidores inteligentes. Se considerará el uso de tecnologías inalámbricas que pueden ser adicionadas a la celular como: WiFi, IEEE 802.15.4g, etc, a más de encontrar la mejor conectividad de la red con el menor costo.

Adicionalmente, se analizará el desempeño del modelo, determinando su eficiencia aplicado a los escenarios propuestos y consiguendo indicadores referidos al modelo planteado.

En esta investigación no se tratará aspectos relacionados a big data, seguridad o ubicación de los sistemas de gestión de datos medidos que pudieran desprenderse a partir del sistema de comunicaciones bidireccional. No es parte de la investigación la red de área doméstica o un posible retorno entre estaciones base y concentradores usando enlaces de fibra óptica, investigaciones que se han determinado con el despliegue de redes FiWi [5].

Importante resulta destacar que los SM forman una red de área vecindaria **Neighborhood Area Network (NAN)** desde donde se intercambia información por multi-saltos hasta lograr la conectividad entre el SM o UDAP cercano con diferentes estaciones base celular, formando así una red **Metropolitan Area Network (MAN)**, red que permitirá llegar hasta la oficina central de las empresas eléctricas formando una red de área amplia **Wide Area Network (WAN)**. La figura. 1.1 permite ver el uso de las comunicaciones inalámbricas en AMI.

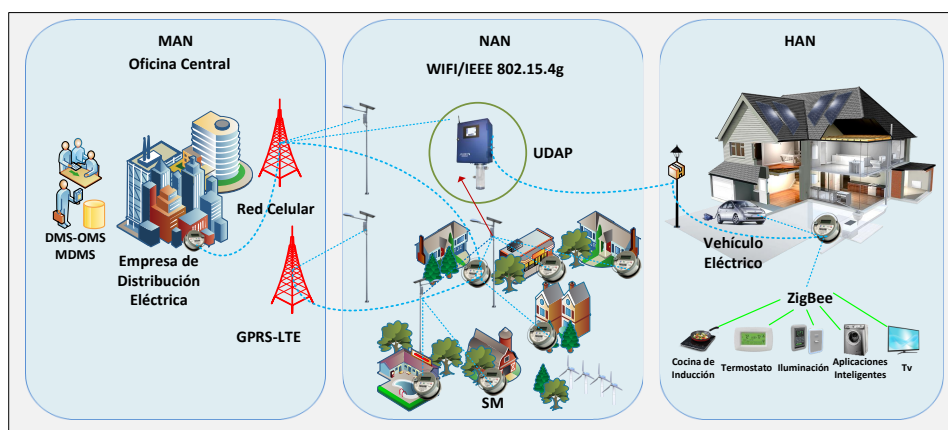


Figura 1.1: Infraestructura de Medición Avanzada usando Redes Inalámbricas Heterogéneas - Fuente Autor

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Proponer y validar las condiciones óptimas del modelo de planeación y escalabilidad para el dimensionamiento de la red heterogénea inalámbrica, como plataforma para el despliegue de la infraestructura de medición avanzada requerida por una red eléctrica inteligente.

1.2.2. Objetivos específicos

Conectividad: Definir los indicadores de conectividad y cobertura de los medidores inteligentes, identificando condiciones de las diferentes zonas, para despliegue de la infraestructura de comunicaciones en AMI.

Optimización: Desarrollar un modelo de planeación para un despliegue escalable de redes inalámbricas heterogéneas, basado en criterios de máxima cobertura, asignación equitativa de capacidad (recursos) y mínimo costo.

Evaluación: Determinar a partir de los modelos propuestos un mapa de ruta con las mejores opciones para despliegue de la infraestructura de comunicación en AMI.

1.3. Contribuciones

Como contribución dentro del modelo propuesto, se advierte una innovación respecto de otras propuestas, en relación a encontrar una planeación óptima y escalable para el despliegue de redes inalámbricas heterogéneas dentro de la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica, que contemple variables identificadas como problemática en la revisión bibliográfica y que permita reducir los costos por la cantidad de recursos empleados.

Inicialmente el proyecto plantea para la asignación de recursos del espectro celular, canales previamente reservados, aleatorios y no disponibles que permitirán determinar una capacidad para albergar clientes de AMI. Se evalúa el espectro cognitivo que puede ser usado por un [cognitive mobile virtual network operator \(C-MVNO\)](#). Para determinar la disponibilidad del espectro de frecuencia celular, se tiene en cuenta la capacidad de los canales que pueden cambiar de forma dinámica entre los diferentes canales de frecuencia en un tiempo determinado. Se trabaja en la detección de los huecos blancos en donde es mínimo el costo por uso del espectro, pero donde la capacidad es mínima se determina el arrendamiento del espectro para garantizar el servicio de medición inteligente.

Posterior a la etapa de asignación de recursos en términos de canales disponibles la investigación se centra en [WHN](#), orientada al acceso inalámbrico de medidores inteligentes. Se considera escenarios reales georeferenciados para las regiones urbanas, suburbanas y rurales. Esto implica varias cosas: a) que

se garantice la conectividad de todos los medidores inteligentes, b) es necesario un enrutamiento que contemple asignación de recursos [Resource Allocation \(AR\)](#) con diferentes tipos de tecnologías inalámbricas según su capacidad y costo y c) la asignación de recursos del espectro celular para contemplar una estrategia de negocio a un operador móvil virtual, destinado a tareas de medición inteligente de energía eléctrica. Las tecnologías inalámbricas disponibles para el proceso de enrutamiento considera a [WiFi](#), Celular 3.5/4G como opciones sugeridas en la revisión literaria científica, el modelo también advierte la posibilidad de incluir otras tecnologías inalámbrica como: IEEE 802.15.4.g, [WiFi](#), etc.

Se supone entonces, un conjunto de medidores inteligentes ampliamente distribuidos y un requisito de capacidad por cada tecnología empleada, de tal manera que no se puede considerar una estación de base celular o punto de agregación de datos universal único. La presente solución, se compone de muchos medidores inteligentes y estaciones base celular (pueden o no existir). El modelo propuesto no resuelve la arquitectura necesaria para interconectar las estaciones base celular. Se considera también que un escenario o parte del mismo, puede partir de un área que no tiene cobertura de estaciones base celular; entonces, el proyecto se centra en el problema de conectividad a cualquier estación base celular más cercana.

El modelo de planeación involucra en el despliegue variables como: cobertura, capacidad (recurso) y costo y según la literatura analizada se ha considerado la elección de la tecnología inalámbrica, el enrutamiento, asignación de recursos y determinación del costo por el despliegue, lo que implica a) solucionar las rutas con tecnología fija (primer nivel), b) enrutamiento y tecnologías considerando recurso a través de una capa cruzada de enrutamiento y asignación de recursos y c) un enrutamiento, con asignación de recursos por uso del enlace y costo referido a la tecnología empleada.

Como contribución del proyecto de investigación también presenta el principio de futuras investigaciones en los siguientes años; siendo un proyecto de aplicación real en el campo profesional y presenta una fuente de información para desplegar una red de comunicaciones que permita la conectividad de sensores inalámbricos para servicio de medición inteligente. Además, permite generar un mapa de ruta para toma de decisiones en el despliegue paulatino de [AMI](#).

El presente proyecto de manera adicional pretende generar impactos de índole: a) académico a través de un producto de grado de referencia para el acompañamiento didáctico de futuras investigaciones en el área de redes eléc-

tricas inteligentes y las telecomunicaciones; b) científico con publicaciones en revistas de renombre científico relacionadas al área de las telecomunicaciones y eléctrica; c) tecnológico con el reconocimiento de las opciones actuales para despliegue de redes inalámbricas.

Este trabajo de investigación presentará una notable contribución al conocimiento en el campo de articulación de las comunicaciones inalámbricas, aplicaciones y mejoras acorde a las necesidades del sector eléctrico en general, abriendo perspectivas para trabajos en la línea de investigación de redes eléctricas inteligentes a partir de una relación colaborativa entre los grupos de investigación de la Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia) y la Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador).

1.4. Organización del manuscrito

El manuscrito de este trabajo ha sido organizado como sigue:

El capítulo 1 presenta la descripción del problema y objetivos de este trabajo. El capítulo 2 se relaciona al estado del arte de la medición inteligente de energía eléctrica. El capítulo 3 presenta la relación de medición inteligente con las comunicaciones inalámbricas heterogéneas. En el capítulo 4 se describe la formulación del problema y su resolución a través de una planeación, escalabilidad y eficiencia de las comunicaciones, en este caso de las redes inalámbricas heterogéneas para AMI, además se presenta el modelo de planeación óptima sobre redes inalámbricas heterogéneas para AMI basado en un problema denominado *capacitated multicommodity flow*. El capítulo 5 se relaciona con los indicadores y análisis de resultados bajo modelización y simulación. Finalmente el capítulo 6 concluye este trabajo.

Capítulo 2

Estado del Arte de AMI

2.1. Introducción

Este capítulo describe el estado del arte de infraestructura de medición avanzada y las soluciones propuestas en torno a la medición inteligente de energía eléctrica y el aporte dentro de una red eléctrica inteligente. El estado del arte se ha concentrado en tres secciones: Aspectos mundiales con relevantes aportes a nivel de Europa y USA; Aspectos regionales en torno a Sudamérica y Aspectos locales entorno a Ecuador.

2.2. Infraestructura de Medición Avanzada en Redes Eléctricas Inteligentes

Una red de comunicaciones en smart grid, posibilita servicios como el control de electrodomésticos, ahorro de energía, reducción de costos [6] por el consumo del suministro eléctrico, la facilidad para que el cliente vea de forma transparente el incremento de la fiabilidad en la lectura del suministro, que pueda optar por servicios como pre-pago [7] del suministro, es decir podrá hacer uso de la electricidad según crea pertinente el usuario, mecanismos para realizar cortes y reconexiones por parte de la empresa de distribución, incluso permitir al cliente cómo y cuándo consumir de forma responsable el suministro eléctrico, además de responder y favorecer una gestión eficiente desde las empresas de distribución [8]. Es importante resaltar que en estos momentos la red de energía eléctrica está experimentando un significativo proceso de

transición en torno a ser inteligente, segura y automatizada. En este concepto se genera una variedad de servicios incluyendo la respuesta a la demanda, gestión de la carga, generación distribuida, valor de consumo en tiempo real y automatización de las subestaciones que pueden ser implementadas conforme avanza la tecnología y el sistema de energía. Entonces, la importancia de *smart grid* o visión, está en la red de comunicaciones que facilita y sirve para proveer información en forma bidireccional de principio a fin, siendo trabajo fundamental para la infraestructura eléctrica [9].

Dentro del concepto de red eléctrica inteligente se incorpora la etapa de medición inteligente, misma que debe estar asentada sobre una avanzada tecnología de telecomunicaciones para soportar la variedad de servicios y que son facilitados y utilizados por los diferentes actores del sistema. De acuerdo al reporte del departamento de energía (DOE) de los Estados Unidos, *smart grid* es un sistema mejorado que entrega electricidad, con facilidades de comunicación y tecnologías de información, que permite ser eficiente y segura a la operación de la red, además de un servicio mejorado para el cliente en un ambiente más amplio. Entre algunas características se tiene:

- Incrementa el uso de información digital y control para mejorar la confiabilidad, seguridad [10] y eficiencia de la red eléctrica.
- Optimiza de forma dinámica las operaciones de la red y recursos con seguridad [11].
- Desarrolla e integra recursos y admite generación distribuida.
- Desarrolla e integra información para obtener una respuesta de la demanda.
- Desarrolla tecnologías de medición inteligente y comunicaciones concernientes al estado y operación de la red eléctrica. Automatización en la distribución.
- Integra aplicaciones inteligentes y dispositivos de consumo.

En AMI se identifican diferentes sub-redes tales como: red de área doméstica o [Home Area Network \(HAN\)](#) [12], red de área en edificaciones o [Building Area Network \(BAN\)](#) y la red de área industrial o [Industrial Area Network \(IAN\)](#) que están orientadas al intercambio de información proveniente de los dispositivos electrónicos instalados dentro de los hogares, edificaciones e industrias, y que envían información hasta los medidores inteligentes, dicho particular no será tomado en cuenta para el trabajo de investigación.

De acuerdo con esta premisa, actualmente existe la dificultad de gestión de las diferentes tecnologías de comunicaciones, que se adapten a cada necesidad, tanto desde para las empresas de distribución que son las encargadas de la administración de la información, como para las diferentes etapas de SG que la

requieran. Son varias las variables que afectan a un sistema de comunicaciones aplicada, la variable según la zona (urbano-rural) [13], distancia, accesibilidad a los servicios de telecomunicaciones existentes, servicios similares colindantes, capacidad de soporte de servicios, seguridad, espectro, situaciones que no permite gestionar un sistema de forma adecuada, la figura 2.1 indica las diferentes etapas de smart grid y de la cual forma parte AMI, punto central a donde se dirige la presente investigación.

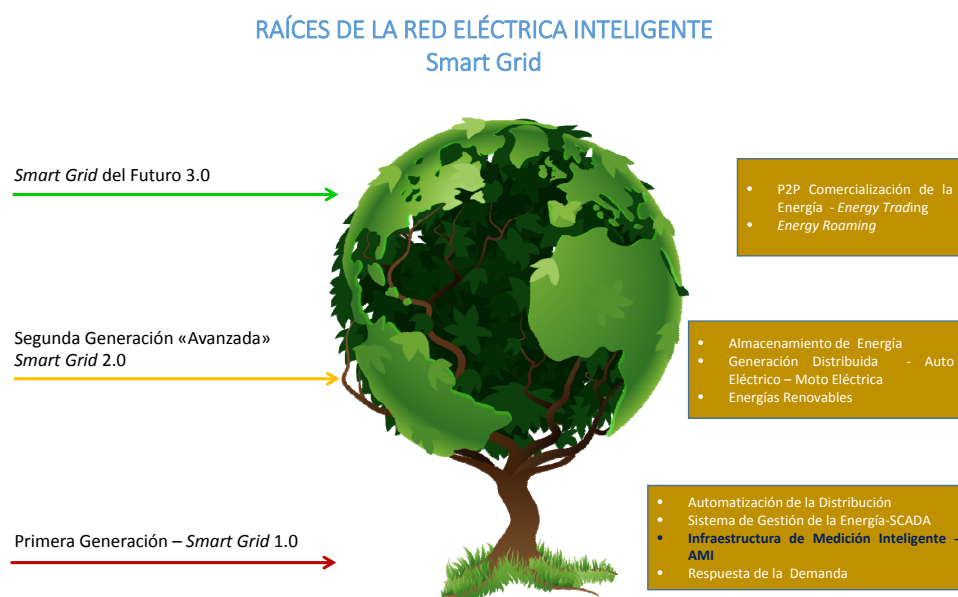


Figura 2.1: Etapas de Smart grid - AMI - Primera Generación Fuente The Advanced Smart Grid- Edge Power Driving Sustainability, Página 8 [1]; Adaptación: Autor

La necesidad actual de ofrecer por parte de una empresa de distribución eléctrica servicios al cliente, genera entonces la búsqueda de mejores soluciones tecnológicas debidamente analizadas y sustentadas técnicamente de acuerdo a un escenario particular, que permitan el intercambio de información

de forma bidireccional y que en la actualidad tiene como servicio tradicional la emisión de la planilla de consumo, resultado de una lectura humana y no gestionada en tiempo real.

En los momentos actuales dentro de las aplicaciones en comunicaciones empleadas para llevar información desde un lugar a otro y concentrarlas para generar un posterior análisis como es el caso del suministro eléctrico, se ha explorado métodos para garantizar la conectividad, por ejemplo para llegar a lugares remotos, la literatura advierte la posibilidad de emplear espacios libres de la frecuencia de TV conocidos como TV *white spaces* [14],[15],[16], concepto que permite reutilizar el rango de frecuencia de TV que no ha sido empleada, esto debido a que el espectro de frecuencia empleado en TV en zonas remotas cubre zonas de difícil acceso o donde hay carencia de red celular. En los inicios de lectura inteligente para minimizar el costo por uso de frecuencia y deslindar de esta tarea de despliegue a las empresas eléctricas se planteó el uso de radio frecuencia RFID en un rango de 902-928 MHz bajo el concepto de no licenciamiento pero con la necesidad de desplegar recursos para la infraestructura como concentradores [17],[18],[19]. En la actualidad se han mejorado protocolos para redes inalámbricas de corto alcance como IEEE 802.15.4g [20],[21],[22] en calidad de estándar y como mejora a Zigbee, de igual manera para permitir el intercambio de información entre concentradores y SMs.

2.2.1. Aspectos Mundiales

El desarrollo de *smart grid* en su temprana fase advierte ciertas aplicaciones de las telecomunicaciones como: banda ancha sobre la línea eléctrica o W-BPL es decir transmisión de datos a través de la línea energizada para ofertar servicios adicionales y la integración de los hogares [23], en Grecia se realizaron proyectos en zonas rurales para controlar el consumo alto de energía en bombas de riego. Este esquema de uso de las comunicaciones sirvió como enlace de última milla para llevar información en lugares remotos donde solo ingresa la energía eléctrica, en el caso citado se realizó para una distancia de 107km [4].

En la figura 2.2, se muestra el avance de los proyectos de mayor realce a nivel mundial tanto de AMR como AMI [24],[25]. Dentro de los casos reales de estudio está el norteamericano y las iniciativas de Europa [26]. - Smart Metering: Medición Inteligente - Smart Cities: Ciudades eficientes e inteligentes (Domótica) - Grid Intelligence: Gestión Inteligente de Redes y de los Sistemas Eléctricos.

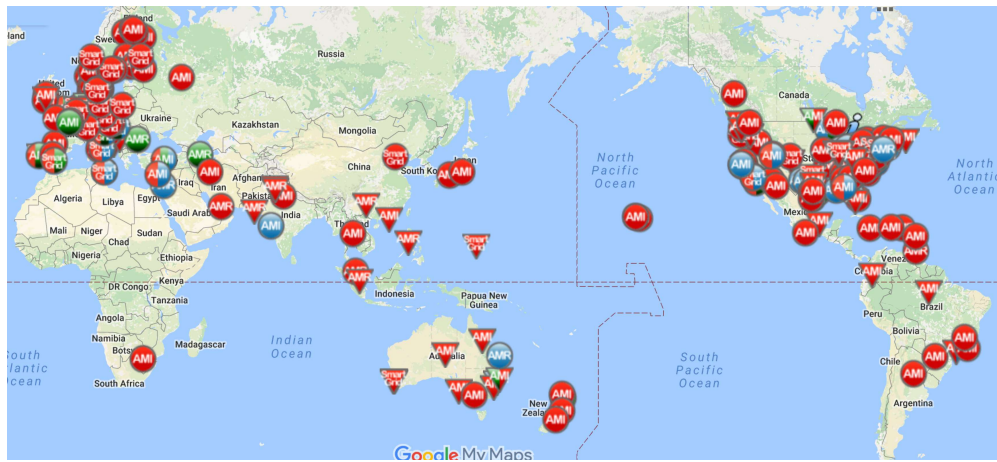


Figura 2.2: Proyectos de AMI-AMR en el Mundo. Fuente Google Maps

Así las necesidades para gestionar servicios adicionales a los consumidores se basan en la asociación de las redes de comunicación con la etapa AMI, por lo que estos clientes podrán tener una gama de beneficios como el monitoreo del uso de energía [27], datos que le permitan economizar en función del precio de la energía para gestionar de forma eficiente la demanda; por otro lado, advierte que la etapa de una red eléctrica inteligente denominada infraestructura de medición avanzada al reutilizar las diferentes alternativas de infraestructuras de comunicaciones existentes, puede lograr el intercambio de información entre el cliente y las empresas de distribución eléctrica e incluso a través de un modelo o estrategia de negocio, minimizar el costo destinado al arrendamiento del espectro de frecuencia del operador primario en lugar de instalar una infraestructura nueva solo con fines específicos de uso para alguna etapa de smart grid.

Con este planteamiento se pretende entonces atender al cliente ya sea que esté en hogares, edificaciones o industrias y dotarles de servicios adicionales al recurso de la energía eléctrica que brinde la empresa distribuidora, usando las tecnologías de comunicaciones existentes de forma adecuada, además se deberá satisfacer a ambos puntos, tanto a la etapa de distribución que es donde se enmarca AMI como al cliente/abonado, que a través de la “comunicación bidireccional”, conseguiría obtener la información necesaria para la optimización [28] del consumo de energía.

En relación a estos particulares el presente proyecto se centra en el empleo

óptimo de las telecomunicaciones para la infraestructura de medición inteligente de energía eléctrica que gestionados por las empresas de distribución eléctrica faciliten los servicios adicionales a los usuarios finales, que apuntan al óptimo uso de la energía situación de gran importancia dentro de la matriz energética de un país [29] y ofreciendo diferentes alternativas de eficiencia energética para el estado. AMI permite la comunicación entre el consumidor y las empresas eléctricas, dotando de herramientas y criterios para optimizar el consumo de energía y reducción del impacto ambiental, pero se debe minimizar el costo por la implementación de dicha infraestructura para lograr su expansión a mediano y largo plazo [30], [31].

Desde las primeras experiencias de implementación de redes eléctricas inteligentes se ha buscado obtener una mayor eficiencia del sistema eléctrico, reducir el gasto energético disminuyendo las pérdidas en la distribución de energía en gran parte buscando aportar al medio ambiente y al costo económico que significa [32], se han presentado varias alternativas como políticas de cada país, pero sin duda alguna que la inversión económica, por la creciente complejidad y heterogeneidad de las modernas redes de telecomunicaciones ha resultado un obstáculo y una proyección de mediano y largo plazo se ha dificultado, debido a la falta de mecanismos idóneos para planificar el crecimiento de dicha red de comunicaciones que permita a un determinado tiempo ser escalable con el mínimo gasto por inversión [33].

Para este antecedente ya han sido varios los proyectos a nivel regional, sudamericano, europeo [34],[35],[36],[37],[38] y norteamericano [39],[40] en los cuales, las telecomunicaciones dan el soporte básico para que smart grid pueda ser implementado, pero existen varios inconvenientes en países en vías de desarrollo debido a la variedad de tecnologías de comunicaciones que presentan un abanico de opciones, incluso opciones que permitirían reusar tecnología existente en la implementación [41] de smart grid, pero se requiere de un adecuado conocimiento para el crecimiento oportuno de la red, según sea la demanda.

En los actuales momentos las aplicaciones en el sistema eléctrico en relación a las diferentes etapas de automatización avanzan paulatinamente de acuerdo a las necesidades del mapa de ruta de cada país por intentar llegar a smart grid, las etapas con mayor desarrollo son: automatización de subestaciones, sistema de información georeferenciada y la infraestructura de medición avanzada.

2.2.2. Aspectos Regionales

En la propuestas a nivel latinoamericano, frente a las diferentes variables que se presentan relacionadas a la infraestructura de medición avanzada, tenemos soluciones factibles que permiten reducir el tamaño de los datos, a través de generar una lectura aleatoria que a pesar de tener un porcentaje de error permitiría reducir el tamaño de históricos, respecto de este particular en medición inteligente se podría generar esta solución. En relación al sistema de monitoreo de área amplia conocido WAMS los sensores llamados PMUs entregan muestras cada treinta segundos, situación no factible para este servicio, mientras que para la red de distribución eléctrica se denota una viabilidad debido a que no se requieren muestras tan continuas durante un día, semana o año. El trabajo presentado en Brasil desde la Universidad de Campiñas da cuenta de esta investigación [42].

Otro aspecto no menos relevante se centra en la caracterización del consumo de electrodomésticos a través de la ubicación de sensores Zigbee que son aglutinados en un concentrador doméstico y que mantiene envío de información hasta el medidor inteligente. Esta red de área doméstica conocida como HAN incrementa un valor agregado para el análisis de respuesta de la demanda eléctrica, pero en ciertos países este particular debe ser previamente aprobado por el cliente, debido a que entrega información que puede ser utilizada para fines delincuenciales [43]. Por otro lado, trabajos relevantes en torno a análisis financieros por implementación de AMI, dan cuenta de la importancia de minimizar los costos por los recursos que esta infraestructura demanda, incluso cuando el retorno de beneficios es importante. De esta manera, la viabilidad económica, indica que cuanto mayor es la infraestructura de red inteligente, mayores serán los beneficios, según estudios en Brasil con los ministerios relacionados al sector eléctrico [44].

En Colombia se presentan trabajos de medición inteligente para la inclusión de fuentes renovables de energía, para analizar si existe disminución por consumo eléctrico convencional como lo presenta el proyecto SILICE III [45]. En otro trabajo se plantean incluso aspectos jurídicos, tarifas para la implementación de AMI en Colombia [46],[47],[48]. La tasa de éxito de entrega de paquetes entre los medidores inteligentes y los concentradores, también es un tema analizado en Brasil respecto de la infraestructura inalámbrica utilizada para medición inteligente en lugares urbanos, suburbanos y rurales, se plantean análisis de modelos de propagación y determinando el que mejor se ajuste al escenario de AMI , teniendo en cuenta la transmisión energía, el ruido am-

biente y la relación señal-ruido necesarios para decodificación exitosa, como se presenta en el proyecto Tele-Siris [49]. Trabajos en Brasil para la óptima ubicación de concentradores, teniendo en cuenta el tráfico también se han propuesto, determinando así, el rendimiento de la red según los multi-saltos [50] existentes entre los medidores inteligentes hasta llegar a un concentrador. Se han considerado tecnología Zigbee en los medidores inteligentes en países de la región, donde las investigaciones en torno al empleo de IEEE 802.15.4 ha generado resultados respecto de simulaciones con opnet y presentando métricas de rendimiento y retardo de la red [51], o comparaciones teóricas de las tecnologías inalámbricas disponibles como se presenta en [52], trabajos con resultados con aspectos relacionados al retardo en los paquetes de información por PLC usado como posible medio de transmisión alámbrica y se lo presenta en [53].

2.2.3. Aspectos Locales

En los inicios de la medición inteligente en Ecuador, con el nacimiento de la lectura inteligente *Advanced Metering Reading (AMR)* [54],[55],[56], se instalaron diferentes tipos de tecnología sectorizadas en lugares de alto índice delictual y hurto de la energía, pero sin haber estimado previamente un protocolo de comunicación adecuado o haber advertido la interoperabilidad entre marcas diferentes, lo que ocasionó que para llegar a una medición inteligente se trabaje en estrategias de negocio para que entre las empresas que fabrican los SMs abran sus protocolos de comunicación ya sea en RFID o GPRS. Para los enlaces de última milla se empleó el servicio de dos empresas de telecomunicaciones que de acuerdo a la cobertura [57],[58] de la zona (urbana-rural) transporte la información de la lectura a las empresas de distribución, en este caso usando Wi-Max para los sitios donde no se disponía de cobertura GPRS. El proyecto requirió de un software para la gestión de cortes y reconexiones de forma automática y para pasar a cliente a una oferta de prepago, este último servicio adicional que se puede ofertar a usuarios con morosidad continua.

Por otro lado, las investigaciones en torno a las telecomunicaciones y su relación con el sector eléctrico, permitieron realizar pruebas de envío de información por línea energizada BPL/PLC [8],[37] para dotar de servicios de internet con costos sumamente elevados y por políticas del estado se eliminó esta competencia de las empresas distribuidoras, el costo fue elevado debido a que la red eléctrica actual no tuvo visión de futuro, además de ser una red aérea, con mucho ruido y propensa a hurtos y manipulación, razón por lo que este

protocolo no tuvo éxito.

Las redes de distribución eléctrica que por años han sido el punto donde mayores dificultades se han presentados, es donde se denota mayor esfuerzo en busca de un cambio sustancial, los entes regulatorios estatales en Ecuador como [Agencia de Regulación y Control de Electricidad - Ecuador \(ARCONEL\)](#) plantean estudios y análisis para dotar de eficiencia y confiabilidad a la red, bajo reformas y normativas amparadas en organismos encargados para dicha tarea como el INEN (Instituto nacional de normalización - Ecuador) y a través de herramientas adecuadas de gestión buscan facilitar la bidireccionalidad del sistema eléctrico incorporando incluso, a nuevos actores como la generación distribuida [Distributed generation \(DG\)](#) proveniente del uso energía limpia o energías renovables y dedicada a revertir el excedente de electricidad a la red convencional, la inclusión de nuevas cargas a la red como el vehículo eléctrico y las cocinas de inducción [59].

Otro avance en el sistema eléctrico tradicional lo generan entidades gubernamentales como el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE—Ecuador) implementando PMU's (sincronofasores) en el sistema de transmisión para monitorear la variación de la tensión y corriente en diferentes tramos del sistema nacional interconectado, con un muestreo de hasta 30 mediciones por segundo aproximadamente. Esto genera información en régimen permanente del sistema nacional interconectado, estos equipos permiten el análisis del estado transitorio de la red eléctrica, como sobrecargas y de esta manera se facilita la gestión a partir de datos confiables para toma de decisiones en un tiempo prudencial y así evitar apagones de largo tiempo denominados blackouts [60]. Para la comunicación de los PMUs y el centro de control se ha utilizado el anillo de fibra óptica que acompaña a la red de transmisión eléctrica.

Todas son diferentes gestiones encaminadas a buscar confiabilidad en las diferentes etapas del sistema, pero la interrogante en *smart grid* se centra en torno a parámetros que tienen importante sensibilidad como lo relacionado, al tamaño de las muestras, al sistema de comunicaciones, a los sistemas de gestión; todos con la finalidad de incluir al consumidor final como actor activo en el sistema eléctrico, ya que es quien genera la demanda eléctrica [61].

En la actualidad no existen servicios adicionales que coadyuven al usuario a ser eficiente con el consumo de electricidad, a estar satisfecho por el servicio que recibe, ofertas, pre-pago, incentivos por generar energía limpia, es decir un pliego de ofertas acorde a lo que la tecnología existente permitiría y que por otro lado, sí se puede percibir en aplicaciones como los ofertados en la telefonía móvil.

En estos momentos, las políticas de estado son determinantes; así, en Ecuador se ha eliminado el subsidio al gas licuado de petróleo para uso doméstico en edificios residenciales que usan sistemas con gas centralizado, poco seguro y confiable, con gran impacto a la salud por los diferentes efectos tóxicos, esta situación tiene impacto social en las economías de dichos hogares y comercios por el uso del hidrocarburo y si a esto se suma los costos de energía eléctrica, agua, teléfono fijo y móvil, el impacto aumenta. Las nuevas variantes del sistema eléctrico como: la alternativa de implementar energías limpias en estas edificaciones en lugar del uso del gas, la carga de los vehículos eléctricos; cocinas de inducción y demás cargas que exigen un dinamismo a la red de distribución, y generan la interrogante de cómo monitorear, gestionar y automatizar, o cómo se genera un mecanismo que coadyuve la reducción en el pago de la planilla, como conocer el costo de generación doméstica de energía en tiempo real, la respuesta es que sin el uso de las comunicaciones no se podría lograr dicho objetivo, razón por la cual el sistema eléctrico tradicional e incipiente requiere de una infraestructura de comunicaciones eficiente y confiable para generar nuevos mecanismos de gestión y reducción de costos en el sistema eléctrico.

Desde la realidad de Ecuador se ha comenzado con la capacitación en los sectores gubernamentales con las empresas de distribución, consejo de regulación, centro de control de energía y los colegios de ingenieros. Los primeros pasos dados hasta el momento han sido referentes a analizar diferentes propuestas internacionales y generar una propia hoja o mapa de ruta [59] que promueva ciertas particularidades, obviamente desde la propuesta de cada país y acorde a la realidad de su sistema eléctrico, además se ha empezado con la automatización de subestaciones de distribución mediante el uso de IED's [62],[63],[64] en los sistemas de protecciones eléctricas, incluyendo como valor agregado la posibilidad de realizar cortes y reconexiones de forma remota de un barrio o sector determinado, esto a nivel de la red de distribución. Se ha incluido un sistema GIS georeferencial [65, 66, 67, 68] de cada subestación y sub-etapa de distribución para las ciudades principales.

El control y regulación gubernamental se ha tomado como línea base las experiencias en el sistema GIS y el sistema de facturación, con la finalidad de implementar en el restante grupo de empresas distribuidoras dichas experiencias. Es decir es una decisión emergente en busca de crear un sistema estandarizado y homologado por el ente regulatorio y así obtener una sola fuente de datos, información de históricos, utilizado para realizar análisis de cargas, entre otros.

De estos cuestionamientos el MEER (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable) tiene como visión “Fortalecer y Transformar las instituciones estatales de Energía, asegurando la calidad y la confiabilidad del servicio” y “Estandarizar la administración de las empresas eléctricas del país y coordinar con instituciones relacionadas al sector para emprender proyectos que permitan mejorar la calidad de servicio al usuario final”

En relación a este antecedente, se presenta la necesidad de investigación en el enlace desde una empresa de distribución al medidor inteligente a través de una red NAN. De esta manera al tener una comunicación bidireccional se podrán entregar servicios adicionales al cliente como corte y reconexión de forma automática, consumo de energía y por otro lado la empresa de distribución disponer de datos para modelar el comportamiento de la demanda energética por cada área, sector, ciudad, país.

En la actualidad el área de corte y reconexión [37] del suministro se realiza de forma manual y la lectura tiene errores y reclamos de los usuarios por no ser información confiable, este es uno de los temas de importancia ya que se necesita cambiar medidores inteligentes y proveer de redes de comunicación para llevar la información desde los diferentes abonados hasta el centro de control y facturación del suministro eléctrico sin manipulación previa de la información por el personal dedicado a dicha tarea. El costo del medidor tiene su mayor rubro referido al tipo de tecnología de comunicaciones presentado en cada modelo.

En la figura 2.3, se aprecia el despliegue de AMR bajo RFID propietario (Elster – Intron - Landis + Gyr) que a inicios del 2010 se desplegó en Ecuador inicialmente un demo de 5000 SMs y que en la actualidad bordea los 90.000 SMs. Este proyecto inicialmente tenía el objetivo de realizar lectura automática de los SMs en zonas urbanas de alto nivel delincuencia y donde el acceso del personal de lectura generaba mucho conflicto, a esto se suma que las zonas expuestas en la figura 2.3 presentaban un índice considerable de pérdidas no técnicas (robo-hurto) del suministro eléctrico. El proyecto tiene una escalabilidad limitada para la inclusión futura de medidores inteligentes, debido a la carencia de cobertura de la red celular en ciertas zonas. Para amortizar los costos no se ha incluido el módulo de cortes y reconexiones en el medidor inteligente.

En la ciudad de Ambato-Ecuador la empresa eléctrica de Ambato ha generado un AMR usando comunicación celular **General Packet Radio Service (GPRS)** dedicado a la lectura de SMs del tipo industrial para clientes denominados especiales con un tipo de facturación diferente al residencial y comercial,



Figura 2.3: Inicios de AMR – Guayaquil-Ecuador – zonificación geográfica de las tecnologías AMI. Fuente Arconel

este demo es de menor impacto con apenas 150 clientes, situación que no genera mayor carga a la red celular y coincidente a esto todas las zonas de dichas empresas tienen acceso a la red celular; por lo tanto una única solución no advierte mayor dificultad.

La tabla 2.1 presenta un resumen del estado del arte referente a la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica ¹.

A continuación el capítulo 3 propone un estado del arte vinculado a las posibilidades de uso de redes de comunicaciones inalámbricas heterogéneas como medio de comunicación en la etapa de medición inteligente de energía eléctrica.

¹Las referencias [60], [69] y [61] constituyen el aporte de estado del arte en el capítulo 2

Tabla 2.1: Resumen de propuestas para desplegar la red de comunicaciones en AMI

Paper	Temática				Problema				Restricciones				Propuesta				
	Autor	Costo	Capacidad	Cobertura	Escalabilidad	Enrutamiento	Planeación	Asignación Recursos	Costo	Capacidad	Cobertura	Tráfico	Costo	Asignación	Clusterización	Tecnologías	Tráfico
Fawaz [70]	✗			✗		✗	✗	✗					✗	✗			
Chen [11]	✗			✗				✗					✗		✗		
Lichtensteiger [17]	✗		✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗			
Malandra [18]			✗		✗	✗				✗	✗		✗				
Ratasuk [6]	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗			
Otani [20]	✗		✗		✗			✗		✗			✗			✗	
Hincapie [22]	✗	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗			
Hossain [4]	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			
Gellings [30]	✗			✗		✗	✗			✗	✗	✗				✗	
EuCommission [35]		✗	✗	✗		✗		✗	✗			✗		✗	✗		
Gungur [37]	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗			✗		
Nusairat [50]	✗	✗					✗	✗	✗		✗	✗	✗				✗
Zhou [71]	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗
Sousa [49]	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗		✗		
Castellanos [51]	✗		✗		✗		✗	✗		✗		✗	✗				
Karimi [52]	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	
Barai [72]	✗					✗	✗	✗			✗	✗	✗				✗
Jiang [31]	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	
Aalamifar [73]	✗	✗	✗			✗		✗	✗	✗		✗		✗	✗		
Wan [74]	✗			✗			✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Fadlullah [33]	✗			✗				✗			✗	✗				✗	✗
Yaacoub [57]	✗						✗	✗			✗	✗	✗				✗
Clark [58]	✗		✗		✗			✗		✗	✗	✗				✗	✗
Masache, Inga [13]	✗	✗	✗		✗	✗		✗	✗	✗	✗			✗			
Inga [60]		✗	✗	✗				✗				✗				✗	
Inga [69]	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	
Inga [61]	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	

Capítulo 3

Red de comunicación inalámbrica heterogénea para AMI

3.1. Introducción

En este capítulo se describe el estado del arte de las redes inalámbricas relacionadas a la infraestructura de medición avanzada. Se analizarán alternativas relevantes a propuestas de solución en torno a encontrar una solución idónea que permita reducir el costo de AMI. Este trabajo se centrará en el uso de redes heterogéneas inalámbricas como solución híbrida contemplando una solución celular articulada a otras opciones de tecnología inalámbrica.

3.2. Redes Inalámbricas en AMI

Las redes inalámbricas cuando son provenientes de diferentes tecnologías de acceso, toman el nombre de redes inalámbricas heterogéneas (WHN); así, una red inalámbrica proporcionará el servicio de conectividad para medición inteligente a través de una red de área vecindaria NAN y que es capaz de mantener la conectividad con una red celular formarán una WHN [75]. La información de consumo de energía eléctrica recogida por los SMs a menudo tiene que ser entregada de forma remota (distancias cortas o largas) a través de trayectorias inalámbricas multi-salto [76] hasta los concentradores de datos UDAP, información que deberá llegar hasta la radio base celular y desde las estaciones base celular finalmente interconectarán con las empresas eléctricas para depositar la información en cada [Meter Data Management System \(MDMS\)](#) y

gestionadas a través de aplicaciones informáticas desde servidores destinados al procesamiento de la información. La óptima ubicación geográfica de estos UDAP tiene un enorme impacto en la calidad y en el rápido despliegue de la red específica de sensores SMs inalámbricos [Wireless Sensor Network \(WSN\)](#) que forman una red [NAN](#). De hecho, pueden existir cuellos de botella (tráfico) que incrementa el consumo energético y disminuyen la vida útil de los dispositivos que forman una [WSN](#); por lo tanto, el enrutamiento de las redes inalámbricas heterogéneas deberá ser el óptimo para minimizar dicho consumo de energía. En este trabajo se considera un escenario georeferenciado de red heterogénea para el enrutamiento de los sensores inalámbricos SMs y que se comunican a través de enlaces intermedios entre los concentradores UDAP, pero empleando tecnologías inalámbricas diversas e interconectadas entre sí. De esta manera es importante ubicar un marco de optimización para encontrar el mínimo número de UDAPs, situación que permitirá minimizar el costo de instalación e incluso el consumo de energía en una [WSN](#), adicionalmente se expone el dimensionamiento según cobertura por multi-salto entre SMs, [UDAP](#), la conectividad entre UDAPs, y posterior enlace con las estaciones base celulares, para garantizar la conectividad de todo el escenario de SMs. En la figura 3.1 se observa el consumo de energía de las tecnologías inalámbricas que pueden ser empleadas en el modelo.

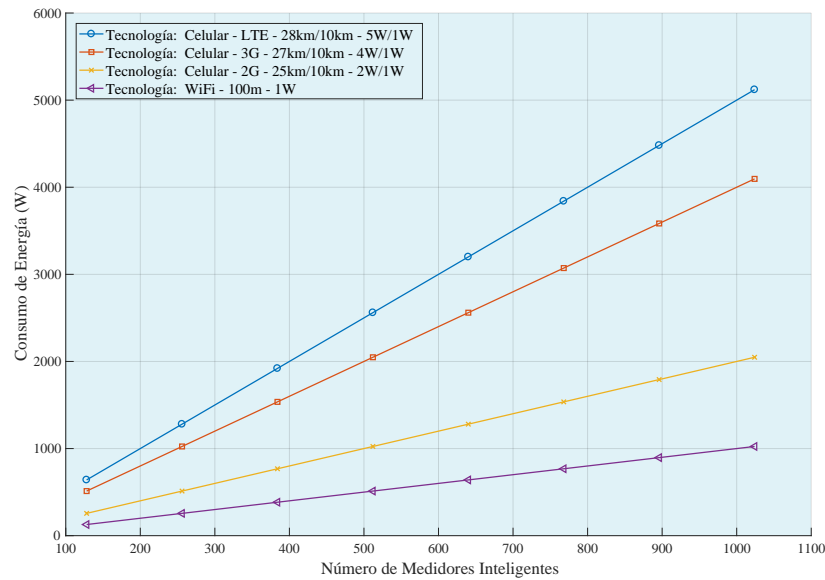


Figura 3.1: Consumo de Energía (W) de las tecnologías inalámbricas por SM Fuente Microwaves & RF - Febrero 2015 [2]

En este trabajo, se contemplan tecnologías inalámbricas con capacidad variable en términos del número de SM que pudieran albergar, en decir la red puede pasar por puntos de concentración UDAPs con capacidad alta y baja, debido a que se considerarán al menos dos tecnologías de acceso inalámbrico, entonces en consecuencia de estas consideraciones la topología se optimiza. Propuestas presentadas pretenden resolver la optimalidad para los escenarios, empleando algoritmos heurísticos que hacen frente a situaciones heterogéneas a gran escala, pero garantizando la escalabilidad de la infraestructura de medición avanzada [77], sin embargo no contempla el flujo de cada enlace. La tabla 3.1 entrega un resumen de las tecnologías inalámbricas empleadas en medición inteligente de energía eléctrica.

En relación a los antecedentes conceptuales que relacionan a la medición inteligente entre SM y empresa de distribución se requiere concentrar los esfuerzos de la investigación sobre la red NAN [78], donde se encuentran problemas relacionados a la cobertura por la ubicación en primer lugar de los SMs [79], lo que ocasiona la dificultad de la salida oportuna de la información hacia otro SM y que en el caso de estar muy distante a un UDAP empleará multi-

Tabla 3.1: Características de las diferentes tecnologías inalámbricas utilizadas para los sistemas de medición inteligente [3].

Tecnología	Velocidad	Banda	Distancia	Ventajas
Inalámbrica	Datos	Frecuencia	Km	Desventajas
Celular				
LTE-A	<i>Sobre 1 Gbps</i>	450 MHz 4,99 GHz	↑ 30Km	↑ <i>Cobertura</i>
3G-4G	60 – 240 Kbps	824 – 894 MHz 1900 MHz	↑ 50Km	↑ <i>Cobertura</i> <i>Con Individual</i>
GPRS	170 Kbps	900 – 1800 MHz	1 – 10Km	↑ <i>Cobertura</i> <i>Con Individual</i>
IEEE 802.11				
IEEE 802.11aj	6,75 Gbps	45 GHz	300m	<i>Confi – Disponibilidad</i> <i>Interferencias</i>
IEEE 802.11ay	100 Gbps	60 GHz	1000m	<i>Confi – Disponibilidad</i> <i>Interferencias</i>
IEEE 802.15.4				
ZigBee	↑ 256 Kbps	868MHz 915Mhz 2,4GHz	10 – 1000m	↓ <i>Consumo Energía</i> ↓ <i>Seguridad</i>
6LoWPan	↑ 256 Kbps	868MHz 915Mhz 2,4GHz	10 – 1000m	↓ <i>Consumo Energía</i> ↓ <i>Seguridad</i>

salto [77] entre SMs hasta llegar a otro UDAP, entonces se consideran enlaces punto a punto (SM-SM/UDAP-UDAP) y punto multi punto (Estaciones Base-UDAP/UDAP-SMs), con lo que se resolvería el primer conflicto de falta de línea de vista de un SM empleando redes de corto alcance; por otro lado, se contempla también que un SM pueda hacer uso de la tecnología celular pero con un costo [12] representativo en relación con redes de corto alcance y solo resolvería el problema de ciertos clientes donde la cobertura celular sea adecuada, para esto se formará árboles de mínima expansión [80],[81],[82] entre los componentes de la topología [83] de red inalámbrica heterogénea.

En lo que respecta al uso de redes inalámbricas en general se presenta el rendimiento y eficiencia variable según la zona de emplazamiento, ya sea en sectores urbanos con desvanecimiento debido a los multi-saltos [84] que deberá tener la información hasta su colector inmediato UDAP y finalmente la reducción de cobertura en zonas rurales por lo que al requerir implementar AMI se facilitaría hacer uso de tecnologías de mayor alcance debido a la ubi-

cación distante del cliente en relación al área de cobertura de una red inalámbrica [85],[86]. Por lo tanto, se contempla que una solución para AMI con redes inalámbricas debe estar definida según el área de emplazamiento de los abonados del sector eléctrico, razón por la cual una planeación óptima que considera todas estas variables se torna favorable en el momento de diseño, dimensionamiento y despliegue de AMI.

Adicionalmente al problema espacial (zona de despliegue), se deben adicionar nuevas variables de importancia en NAN [87] y es la relacionada al costo por tipo de tecnología de comunicación que se debe incluir en cada SM o en los colectores UDAPs (multi-radio)[88], particular que varía en función del tipo de red inalámbrica que mejor se ajusta a la necesidad de AMI en la zona; de esta manera, estos costos deberán ser incluidos en el modelo de planeación para que la solución advierta un área de búsqueda de importancia en el estudio.

Adicionalmente, si se avanza hacia la red de área metropolitana MAN [89], es decir cuando se habla específicamente de la estación base celular, que será la que permita interconectar a nivel de última milla con las empresas eléctricas, se encuentran restricciones de capacidad de canal de dichas radio base celular, que en primera instancia tiene como su usuario primario a la telefonía móvil [14], o incluso si se considera la coexistencia de operadores móviles virtuales *Mobile virtual network operator (MVNO)* [90],[91], [92] estas restricciones determinan un problema de asignación oportuna de recursos [93],[94], de tal manera que se garantice la conectividad de usuarios primarios y secundarios.

Cuando se considera un MVNO [95],[12],[78],[94] se puede hablar del uso del espectro del operador secundario [96] para tareas específicas de medición inteligente y donde los canales pueden estar previamente reservados [97] [70],[93],[91], garantizando así la disponibilidad de recursos de última milla para AMI, mientras que al adicionar el concepto de *radio cognitiva* [22],[98] al tradicional MVNO para formar C-MVNO, se puede encontrar huecos blancos que permitirían obtener una asignación aleatoria de canales, con menor costo en relación al MVNO tradicional, pero al mismo tiempo se puede tener canales no disponibles, lo que no garantizaría a priori que la información llegue hasta su destino final en los MDMS [71],[72],[74]. La figura 3.2 permite identificar la propuesta si se considera únicamente a la red celular como medio de transmisión entre SMs y las empresas de distribución.

De lo antes mencionado el acceso al espectro tiene naturaleza híbrida, en el que ambas bandas del espectro con y sin licencia están inteligentemente articuladas pero deben ser programadas para la transmisión de servicios de AMI,

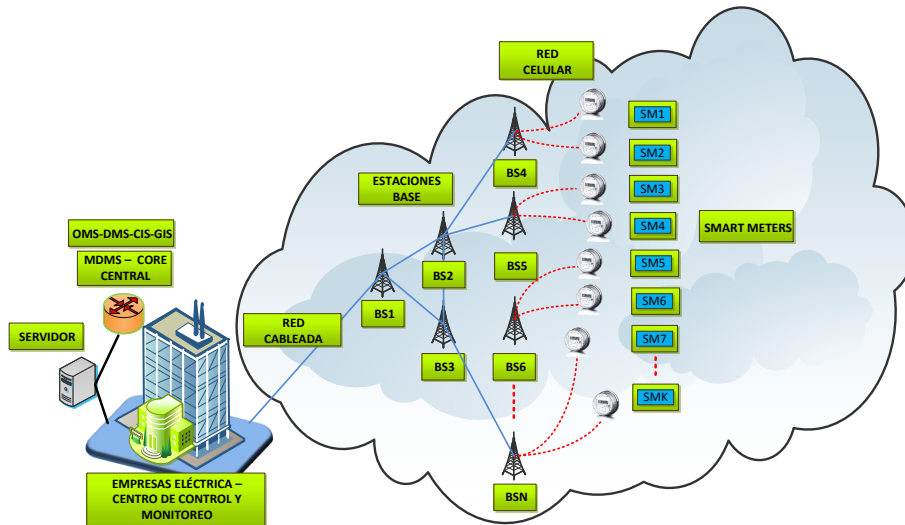


Figura 3.2: Arquitectura AMI - Red Celular. Fuente Autor

situación presente en este trabajo de investigación.

El número óptimo de canales arrendados y reservados están dispuestos en dos dimensiones para el análisis de la cadena de Markov y posterior a esto se plantea una asignación de canal por emparejamiento. Entonces el proyecto permite una estrategia de acceso al espectro híbrido para verificar si existe mejora significativamente en la capacidad de la red celular en el apoyo a los servicios de red inteligente, en comparación con la estrategia tradicional de acceso al espectro fijo.

Cuando se habla de uso de la red celular como opción para que SMs transmitan datos de AMI, se debe contemplar que los medidores inteligentes deben comportarse como celulares pero con cero movilidad y de esta manera se estaría incluyendo nuevos dispositivos celulares con un tráfico adicional característico permanente según muestra la tabla 3.2.

De esta manera la planeación de la red de comunicaciones para AMI contempla una serie de opciones viables desde el punto de vista tecnológico, pero sin duda alguna que las propuestas idóneas serán aquellas que permitan un despliegue rápido y oportuno, con el menor costo de inversión y con escalabilidad para el corto, mediano y largo plazo según estime su crecimiento cada

Tabla 3.2: Funcionalidades y necesidades de las comunicaciones en AMI. Fuente Smart meters and the smart grid: privacy and cybersecurity considerations – Página 130

Requerimiento	Rango
Ancho de Banda	10-100 kbps/nodo,500 kbps por retorno
Latencia	2-15 Segundos
Confiabilidad	99-99.99%
Seguridad	Alta
Respaldo de energía	No es necesario

una de las empresas de distribución eléctrica.

Entonces si la infraestructura es óptima se pueden reducir costos; en tal sentido, si se optimiza la asignación [99],[100],[101],[102] de recursos con el objetivo de lograr leer el mayor número de medidores se puede reducir dichos valores asociados, brindando así un crecimiento sostenible de la red, pero asegurando que el rendimiento de la red es el adecuado y confiable en lo que respecta al envío y recepción de información entre SMs.

Una red ideal para la infraestructura de medición avanzada deberá contemplar varias tecnologías, por lo que la transmisión de información entre los medidores inteligentes y las estaciones base celular será través de un enlace ascendente (uplink) [103],[104],[105],[106],[107] de tipo inalámbrico como WiFi, IEEE 802.15.4g, etc para reducir los costos y agilizar el despliegue de la red. Debido a la dispersión de ubicación de los hogares, a través de técnicas y algoritmos de clusterización se pueden agrupar a los SMs y así determinar la mejor ubicación de los UDAPs y determinar la cercanía a las estaciones celulares. En la figura 3.3, se indica una propuesta de red de comunicaciones, que puede ser utilizada para medición inteligente y que permite cohabitar a la telefonía celular, redes inalámbricas de corto alcance, fibra óptica (no analizada en este proyecto) y la ubicación de los medidores inteligentes.

Existen trabajos relacionados y propuestas para conseguir una planeación de redes inalámbricas heterogéneas. El trabajo científico relacionado con el despliegue óptimo de AMI relaciona experiencias previas al desarrollo en red de sensores inalámbricos en exteriores, la ubicación georeferenciada del diseño, la planeación para su rápido emplazamiento, el enrutamiento de la red inalámbrica heterogénea y las proyecciones de expansión según la condicio-

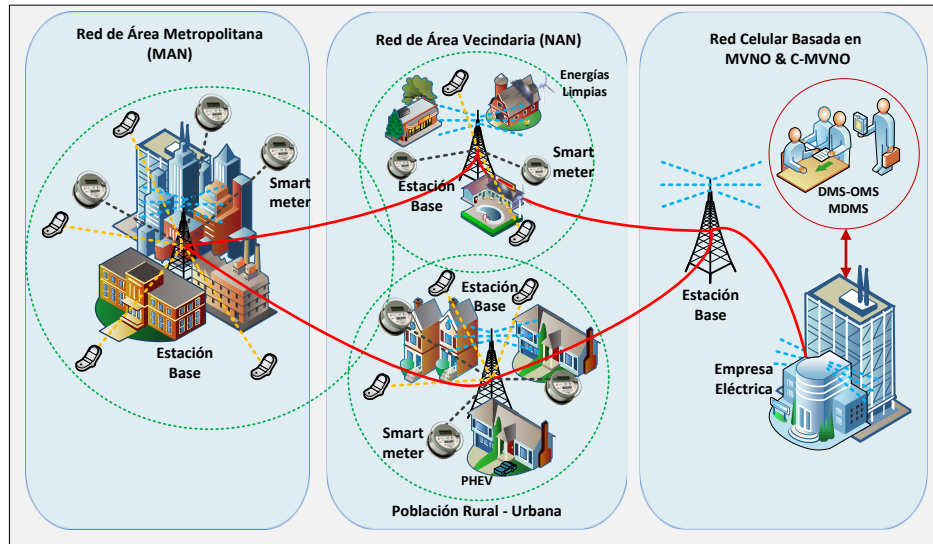


Figura 3.3: Infraestructura de Medición Avanzada con Red Celular Fuente Autor

nes de demanda que se presenta a lo largo del tiempo.

Partiendo de lo propuesto en [13],[69],[108],[5], se visualizan escenarios reales georeferenciados para la ubicación SMs utilizando mapas como los facilitados en sitios web y que permiten la descarga de un archivo de extensión **Osm** que puede ser leído desde Matlab se pueden determinar los puntos deseados en función de longitud y latitud [109], para esto se ha considerado que la distancia entre dos puntos no será una distancia euclidiana, sino por el contrario debe usarse la distancia de haversine [110],[111].

Se considera la ubicación (fija o aleatoria) de los sensores **SM** y concentradores **UDAP**, así como de las estaciones base celular EB dentro de la grilla de trabajo, determinando de esta manera a los SMs que pueden ser ubicados a priori en cada ciudadela de forma georeferenciada; la ubicación de los **UDAP** en las esquinas, debido a que usualmente se pueden emplazar en los postes de alumbrado público, no así las estaciones base celular existentes que tienen una ubicación previa en el modelo de planeación para los escenarios de zonas urbanas y suburbanas.

Cuando los escenarios posibles para formar una red de sensores inalámbricos [112] requeridos en **AMI** se presentan, es necesario considerar que para iniciar el proceso de optimización, los SMs deben llegar a tener una cobertura

ra total para garantizar su conectividad, pero el número de UDAPs deben ser el mínimo posible para reducir el costo; de esta manera, se considera inicialmente un conjunto de sitios candidatos para las posibles ubicaciones de los UDAPs, el proceso de optimización debe indicar qué UDAP debe estar activo; entonces, el despliegue referido a la posición geo-referenciada emplaza dicho concentrador. Trabajos presentados en [108],[73],[113],[84],[85],[114],[86], advierten la necesidad de formar conglomerados [115],[116] de SMs previo al enrutamiento y de esta manera permite determinar la capacidad máxima de cada subconjunto de conectividad, para esto se ha propuesto trabajos de clusterización mediante kmedoids; delaunay [117, 118] y voronoi [119, 69].

Trabajos iniciales para formar cluster de SM se pueden apreciar en [104, 69] y los aportes respecto a otras metodologías de clusterización [120].

Propuestas científicas en relación al agrupamiento requerido para el enrutamiento de los SMs, han presentado una necesidad de generar un grafo que permita la conectividad de los elementos de la red de sensores inalámbrica, es así que este trabajo de investigación doctoral ha propuesto el uso del algoritmo de PRIM para encontrar un mínimo árbol que cubra los SMs y forme un grafo conexo, no dirigido; es decir el algoritmo encuentra un subconjunto de aristas que forma un árbol con todos los vértices, en este caso se aprecia que el peso total de las aristas en el árbol formado resulta el mínimo posible, otras propuestas se presentan en [121],[122],[123].

En consecuencia de lo anteriormente comentado, al requerir que se garantice la cobertura a su máximo posible, en función de los UDAPs ubicados en los vértices de un grafo no dirigido se presenta en varios trabajos la posibilidad de usar heurísticas para resolver un problema de Setcover [124], [125], [126], [127] para esto previamente se ha planteado al problema como tipo combinatorio NP – *Complete*, en este caso se desea formar un conjunto de elementos al que se denominaría universo como el de SMs y n conjuntos cuya unión comprende el universo; de tal manera, que el papel del algoritmo será identificar el menor número de conjuntos cuya unión contenga al mayor número de elementos del universo, en este caso los conjuntos pasarían a formar los conglomerados, de forma similar a lo que se presentó anteriormente con los métodos de clusterización usando K-medoids; delaunay y voronoi.

Debido al gran número de SMs que pueden estar ubicados en diferentes sitios en los cuales pueden o no estar supeditados a cobertura de un UDAP, es necesario generar un árbol de mínima expansión, en este punto la presente propuesta genera una heurística basada en un *Steiner Tree*, heurística que plantea una optimización combinatoria, la misma que encuentra la intercone-

ción más corta para un conjunto dado de elementos, determinado entre SMS y UDAPs. El *Steiner Tree* está basado en el mínimo árbol de expansión (MST – Minimum Spanning Tree), heurística que parte de un conjunto V de puntos denominados vértices e interconectados por una red (grafo) con las longitudes más cortas, en este caso la longitud es la suma de las longitudes de todos los bordes, así la diferencia con el minimum spanning tree o árbol de mínima expansión radica en que la heurística de *Steiner Tree* tanto los vértices como las aristas intermedias adicionales pueden ser incluidas en el grafo con el fin de reducir la longitud del árbol de expansión. Estos nuevos vértices introducidos para disminuir la longitud total de conexión que son los puntos Steiner o vértices Steiner. Trabajos similares se presentan usando métodos de triangulación [128], mínimo árbol euclidean de steiner [129] o un árbol steiner incluyendo nuevos nodos steiner [130], también se adiciona convex hull para identificar las áreas segmentadas [131], se han comparado los árboles de enrutamiento *Steiner Tree* con spanning tree [132]; así como, un restablecimiento de la red de comunicaciones posterior a un desastre y se presenta en [133].

Dentro de la literatura analizada se ha encontrado que el uso de meta heurísticas como búsqueda tabú o *tabu search* [134], [135], podrían aportar a este proyecto a manera de exploración de un conjunto de soluciones factibles y determinar cuál presenta una mejor solución según las variables analizadas para lograr una planeación una red heterogénea inalámbrica [136]. Existen otros aportes para la exploración del conjunto de soluciones factibles a través de heurísticas basadas en enfriamiento simulado o *simulated annealing* que tiene característica similar a una meta heurística, tal como se denota en [137], [138]. Se evidencia en la literatura que la meta heurística búsqueda tabú se ha utilizado como un método de optimización matemática que busca una solución mejorada a través de estructuras de memoria cuando una potencial solución es encontrada y pasa a formar parte de una lista denominada tabú de tal manera que no se vuelva a explorar la posible solución y así encontrar una solución global; para el caso de enfriamiento simulado que también es un algoritmo de búsqueda para un problema de optimización global se busca encontrar una mejor aproximación al valor óptimo de una función dentro de un espacio de búsqueda grande de posibles opciones, para dar respuesta a lo que la heurística planteó como objetivo en función de las variables incidentes en el problema combinatorio.

Por otro lado, en lo referente a la literatura científica relacionada al espectro de frecuencia en operadores virtuales, se advierte la posibilidad de una asignación equitativa de los canales de la red celular como se presenta en [93],[96]. Es

importante denotar que existe la posibilidad de usar el espectro libre a través de un acceso oportunista con la finalidad de minimizar los costos del arrendamiento en el caso de ser un MVNO y formando un C-MVNO [139].

Trabajos preliminares buscan una escalabilidad de la red heterogénea inalámbrica como se presenta en [95], contemplando cobertura a través de un enrutamiento, pero resulta necesario encontrar una provisión óptima en asignación de recursos articulados al enrutamiento, para esto se ha definido una técnica bajo la terminología de cross layer que identifica investigaciones que articulan las capas del sistema OSI en sentido vertical a partir de algoritmos distribuidos para lograr eficiencia ya sea por asignación conjunta de recursos a través de enlaces inalámbricos y control de flujo dentro de la red. En este caso si se balancea la carga de la red se puede evitar la congestión y mejorar el rendimiento de manera global; otro caso podría ser en el enrutamiento con una red cognitiva donde se debe tener este equilibrio y que incluso puede elegir rutas de enrutamiento cualificados. En resumen este intercambio de información entre las capas permite una efectividad del modelo de planeación por considerar al mismo tiempo variables de diferentes capas, hasta conseguir una optimización en conjunto. Se podría entonces considerar de cruce de capas (cross-layer): enrutamiento-asignación de recursos (rutas y tecnología) y otro cruce de capas: enrutamiento-asignación de recursos (canales)-costo [140], [141],[142],[143],[144],[145],[146], [147], [148].

La figura 3.4 enmarca la infraestructura de medición avanzada total, cabe recalcar no se ha trabajado sobre el retorno (backhaul) de fibra óptica en Estaciones Base y/o UDAPs que se presenta en artículos publicados bajo el concepto de red fibra-inalámbrica (FiWi Networks)[108],[5],[149] y la figura lo representa en color rojo.

Para que el AMI sea considerado como un componente eficiente y confiable de la Smart Grid, es necesaria una comunicación garantizada entre SMS y empresas de servicios públicos. Este requisito implica decisiones importantes, tanto tecnológicas como económicas, que deberían estar alineadas con el objetivo de proporcionar cobertura completa a las SM, considerando variables como la ubicación geográfica [150] de los clientes, la densidad de población y la infraestructura de comunicación existente, lo que puede ayudar a reducir los costos de conectividad, especialmente en la última milla [151].

En términos de ubicación geográfica y densidad poblacional de los clientes, en este trabajo se considera: *i*) escenarios urbanos con densidades de población medianas a altas, donde se requiere expandir la infraestructura de medi-

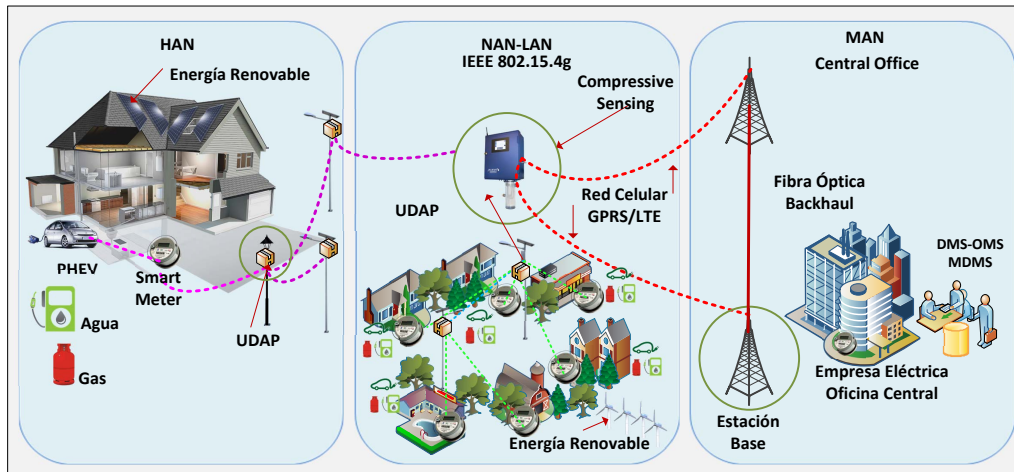


Figura 3.4: Infraestructura de medición avanzada. Fuente Autor

ción inteligente a partir de una red de comunicación celular preexistente o implementar una infraestructura de comunicaciones completamente nueva para dar soporte al tráfico que se origina en AMI y *ii*) escenarios rurales con densidades de población bajas que pueden o no tener una infraestructura de comunicación celular preexistente. Con respecto a la escalabilidad del WHN propuesto, es un requisito para que la red tenga un tiempo de despliegue corto, así como la capacidad de garantizar cobertura a los clientes de la red eléctrica. Una solución inicial podría considerar el caso en el que los SM, dependiendo de su ubicación, se conectan a la estación base celular más cercana. Tal solución puede satisfacer el corto tiempo de despliegue, pero dado el número esperado de clientes SM, también requerirá capacidades adicionales de la red celular. Por lo tanto, se ha propuesto una entidad intermedia, un UDAP, para minimizar la carga en la red celular, al mismo tiempo que se garantiza la cobertura a los SM que forman agrupaciones o conglomerados más pequeños.

Además, se considerará que los SM pueden estar equipados con tecnología inalámbrica que también permite la conectividad multi-salto [152]. La capacidad de multi-salto en SMs se ha considerado previamente para permitir que ciertos SMs sirvan como relevo para otros SMs que están fuera del alcance de la red celular. Sin embargo, la capacidad de un SM es limitada, además está el hecho de que un solo SM podría ser sobrecargado al servir de paso a un gran

número de SMs fuera de rango al mismo tiempo que está tratando de enviar su propio tráfico. En su lugar, se considera la entidad UDAP adicional, que tendría una mayor capacidad que un SM, además de las capacidades de múltiples radio [153] y conectividad a la infraestructura celular.

Considerando las diferentes opciones de configuración dependiendo de las tecnologías inalámbricas disponibles, es necesario definir clústeres o conglomerados adecuados para conseguir la conectividad. En este caso, por ejemplo, se considera que tecnologías inalámbricas diferentes estén disponibles para la conectividad de SM y UDAP. Además, dado que la escalabilidad de la red de comunicaciones AMI tiene una estrecha relación con los costos de despliegue y mantenimiento, debería existir un despliegue óptimo que minimice el número de recursos al considerar la combinación de tecnologías inalámbricas disponibles y sus capacidades. Las posibilidades y restricciones antes mencionadas hacen que sea un problema no trivial encontrar la configuración de red óptima [154]. En los trabajos preliminares de este trabajo de investigación se considera la existencia de una SM y un UDAP, pero para el trabajo final el mismo SM tiene la posibilidad de ser un UDAP debido a la característica flexible para articular una tarjeta de comunicaciones de diferente tecnología en el interior del SM.

En este trabajo se propone un mapa de ruta escalable para una red de comunicación que cumple con un tiempo de despliegue corto, con los menores costes de despliegue y que cubre el mayor número de clientes según un número de SMs determinado por la empresa de distribución eléctrica. Para resolver el problema, se emplea el posicionamiento georeferenciado en cada escenario de acuerdo con la capacidad [17], la cobertura y los costos tecnológicos de los diferentes componentes de la red: estaciones base celulares, puntos universales de agregación de datos y medidores inteligentes.

El objetivo es identificar las condiciones óptimas de planificación para obtener un WHN escalable y eficiente para AMI. Se emplea modelos teóricos así como simulaciones para caracterizar los diferentes escenarios de despliegue urbano y rural. El análisis proporciona el porcentaje de contadores inteligentes que tienen conectividad a la oficina central de las empresas eléctricas de distribución, así como el número de recursos necesarios para una implementación específica o que serán necesarios para una implementación futura. Además, también se proporciona un árbol de enrutamiento basado en la heurística de *Steiner Tree* [153, 155, 156], que se basa en la teoría de grafos. Con esto, se puede establecer un grafo de enrutamiento entre los diferentes componentes empleados para desplegar el WHN. Por lo tanto, además de determinar las ubicaciones óptimas de UDAPs, también se presenta la interconexión de cada SM

al UDAP y la ruta correspondiente desde cada UDAP a las estaciones base celulares.

Adicional al modelo de asignación de recursos y el modelo heurístico de enrutamiento, el presente trabajo presenta un modelo a través del método de generación de columnas como método heurístico para resolver el problema de enrutamiento basado en restricciones. El método de generación de columnas [157, 158, 159, 160] en primera etapa procede a resolver un problema de la ruta más corta y así encontrar rutas alternas con un costo reducido (negativo), posterior a esta etapa se procede a verificar la viabilidad de las nuevas rutas obtenidas en términos de flujos [161] y otras restricciones que pudieran ser introducidas al modelo. Se advierte en la literatura que este método supera el método de búsqueda tabú en función de la confiabilidad de la solución y del tiempo empleado en el cálculo. Entonces, la relación con el objetivo del método y el presente trabajo se enmarcan en buscar y encontrar un conjunto de rutas que conecte a cada SMs y determinar en términos de cargabilidad los flujos dentro del árbol de enrutamiento con alternativas para minimizar el coste total de transporte de información en el enrutamiento [162, 163, 164].

De esta manera el método de generación de columnas [165, 166] es aplicado a una red de flujos, donde cada enlace tiene una capacidad definida y los recursos asignados se encuentran definidos desde un SM origen a un SM destino, atienden a una demanda definida. Es así que una fracción del flujo de información podría dirigirse a través de otro enlace que exista en la topología original de la red inalámbrica; por lo tanto, existe varios caminos que podrían ser utilizados para llevar el total o la fracción del flujo de información; de esta manera, se encuentra una asignación de todas las variables de flujo [167, 168, 169, 170] que satisface un conjunto de restricciones como; capacidad del enlace, conservación del flujo a través de los SMs factibles de tránsito y consiguiendo conservar al flujo del nodo de entrada igual al flujo del SM de salida [171, 172, 173, 174].

Realizar esta tarea permite obtener una carga balanceada del flujo con el mínimo costo [175, 176, 177] debido a la optimización del uso del enlace con el mínimo de los recursos. Lo propuesto en este trabajo de investigación está estrechamente relacionado desde el concepto mismo a un problema combinatorio del tipo NP-complete; además, al mantener flujos de información fraccionados, el problema puede resolverse en tiempo polinomial a través de la programación lineal [178, 179, 180].

En la etapa de medición inteligente, donde la base fundamental es la red inalámbrica heterogénea, el enrutamiento óptimo de la información depen-

de de las capacidades de cada enlace, los mismo que están determinados por la asignación de recursos en términos de la tecnología de comunicaciones. El rendimiento óptimo de la red sólo puede lograrse mediante la optimización simultánea del enrutamiento y la asignación de recursos. La literatura advierte que el método de generación de columnas asociado a la resolución del problema de capacidad del flujo por múltiples recursos [181, 182, 183, 184] y como solución resultante consigue la coordinación óptima del enrutamiento de datos en la capa de red y la asignación de recursos en la capa física a través de la fijación de precios en las capacidades de enlace y de esta manera se obtiene un cruce de capas [185, 186, 187].

Trabajos doctorales también fueron revisados para conocer los aportes relevantes en torno a medición inteligente de energía eléctrica y AMI, el problema de asignación de recursos con análisis de retardos, latencia de redes celulares para medición inteligente es propuesto por [188], un concepto de radio de cognitiva y un protocolo de enrutamiento se analiza en [189], una red híbrida a través de 802.11n en articulación con una red en línea energizada se encuentra en [190], la seguridad en los protocolos de comunicación es discutido en [191]

La tabla 3.3 presenta un resumen del estado del arte referente a la red de comunicaciones requerida por AMI¹ son aportes con resultados preliminares y que se adjuntan al estado del arte.

¹Las referencias [149], [139] y [95]

Tabla 3.3: Resumen del estado del arte de red de comunicaciones inalámbrica que aporta a [AMI](#)

Paper	Temática				Problema			Restricciones				Propuesta				
	Costo	Capacidad	Cobertura	Escalabilidad	Enrutamiento	Planeación	Asignación Recursos	Costo	Capacidad	Cobertura	Tráfico	Costo	Asignación	Conglomerados	Enrutamiento Flujo	Heurística-Algorithm
Souza [21]		✘	✘		✘		✘		✘	✘	✘		✘	✘		✘
Wietfeld [27]	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘				✘
Kulkarni [83]	✘		✘		✘		✘		✘		✘				✘	✘
Iyer [151]	✘						✘	✘			✘	✘	✘			
Rolim [124]	✘	✘	✘		✘	✘		✘	✘	✘		✘		✘		✘
Senturk [155]	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘				✘
Li [97]	✘	✘					✘	✘	✘			✘	✘	✘		✘
Bou-Harb [92]	✘	✘		✘			✘	✘	✘			✘	✘			✘
Shakkottai [156]	✘	✘	✘		✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘			✘
Wang [127]	✘	✘	✘	✘				✘	✘	✘		✘		✘		✘
Huang [126]	✘	✘	✘	✘				✘	✘	✘		✘		✘		✘
Ding [88]	✘	✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘			✘
Ting [152]	✘	✘	✘	✘			✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘
Xiao [168]	✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘	✘			✘
Adam [185]	✘	✘			✘		✘	✘	✘	✘		✘	✘			✘
Gendron [171]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘	✘
Alvelos [177]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘			✘
Mahvash [174]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘			✘
Masri [179]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘			✘
Barnhart [161]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘			✘
Holmberg [157]	✘	✘					✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘	✘
Inga [149]	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘				✘
Peralta, Inga [108]	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘		✘		✘
Peralta [192]	✘		✘	✘	✘	✘		✘		✘		✘		✘		✘
Ganan, Inga [150]	✘	✘	✘		✘	✘		✘	✘	✘		✘		✘		✘
Inga [139]	✘					✘	✘			✘	✘	✘	✘			✘
Inga [95]	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘

Capítulo 4

Formulación del Problema

4.1. Introducción

El presente capítulo describe la formulación del problema de optimización. Inicialmente se propone un modelo de asignación equitativa de canales asumiendo que en medición inteligente únicamente se utilizará la red celular como medio de comunicación para lograr la conectividad entre los medidores inteligentes y las empresas de distribución, para este modelo se asumen tres premisas: usuarios primarios de telefonía celular; usuarios secundarios y usuarios cognitivos que emplean el espectro no utilizado de los usuarios de telefonía celular. En la segunda etapa se realiza un modelo de optimización heurístico con la inclusión de un UDAP como concentrar y se realiza el enrutamiento de redes inalámbricas heterogéneas ya que se incluye otra tecnología inalámbrica que permite realizar multi-salto entre SM. Esta etapa contempla un agrupamiento de un cierto número de SM por cada UDAP. En la tercer y última etapa se plantea un modelo heurístico que contempla ahora una asignación de recurso en cuanto al flujo de información que transita por cada enlace inalámbrico, buscando encontrar el mejor enrutamiento con la menor congestión de los enlaces inalámbricos a través de multi-salto, se tiene incluidas las restricciones de costo y capacidad pero se garantiza la conectividad de los SM. Para esta etapa se debe tener en cuenta que un SM puede ser considerado como un UDAP.

La figura 4.1 muestra un panorama general de lo realizado en el proyecto de investigación y debido a la complejidad del problema se presenta de manera desagregada, pero de manera estructurada para solventar y obtener los objetivos planteados. La interacción de los algoritmos propuestos se disponen

en tres etapas. La **etapa 1** hace relación al problema de asignación de recursos en términos de canales celulares, para esta etapa se considera como única opción de comunicación para AMI a la red celular. La **etapa 2** trabaja el enrutamiento de manera óptima considerando UDAPs para lograr conglomerados de SM balanceados y se incorpora otra tecnología inalámbrica para disminuir los costos con una única tecnología. Finalmente la **etapa 3** presenta un modelo mejorado respecto de la **etapa 2** en la que se incluyen una capacidad del enlace inalámbrico y donde se encuentran las rutas descongestionadas que aporten al enrutamiento inicial de una red heterogénea y garantizando la conectividad de los SMs.

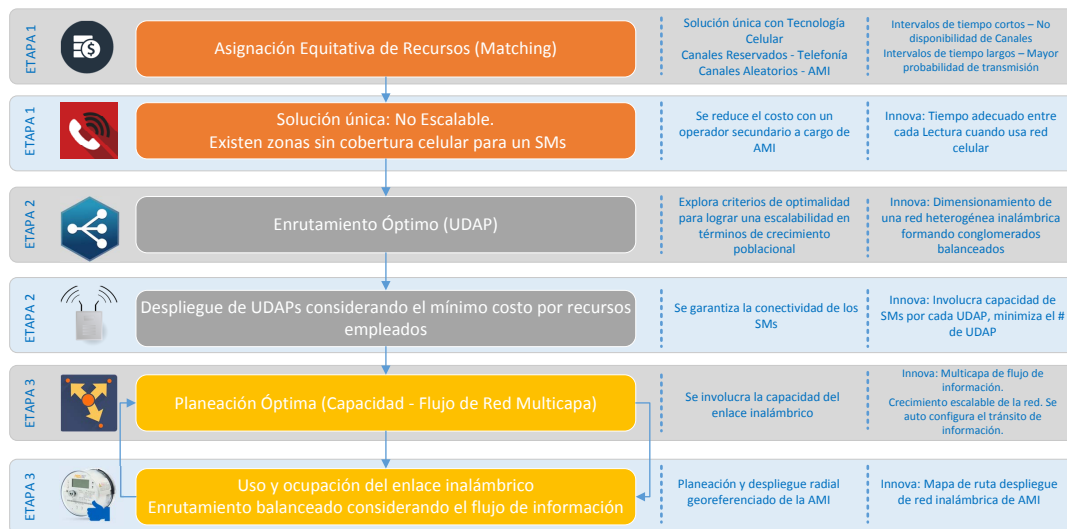


Figura 4.1: Etapas del proyecto de investigación. Fuente Autor

4.2. Problema: Asignación de Recursos

Se supone una red inalámbrica celular inicialmente establecida y construida por un operador de red móvil (operador primario). Cada celda en la red tiene un conjunto de canales que no interfieren con celdas vecinas. Esta red primaria

se utiliza para proporcionar voz y acceso de datos para los usuarios de telefonía celular. El proceso de ocupación de canal se asume que es Markoviano.

De igual manera se asume que en la misma zona existen varios SMs que se ubican al azar. Por lo tanto, cada celda tiene un conjunto de SMs que requiere periódicamente un canal de enlace ascendente. Este trabajo se centra en un único modelo celular, con un número N de canales disponibles y un número M de SMs cubiertos. Se supone un operador móvil virtual que puede dotar de servicio de comunicación en la infraestructura de medición avanzada, desde una empresa eléctrica u otra entidad independiente al operador celular, a este tipo de operador se conoce como operador móvil virtual de red **MVNO**. Es así que el operador primario de red celular o **Mobile network operator (MNO)** celular separa sus canales en tres subclases:

- a) un conjunto de N_r canales reservados asignados exclusivamente para usuarios de telefonía celular;
- b) un conjunto de N_f canales fijos para **MVNO**, que serán pagados; y serán utilizados solamente para transmitir información de medición inteligente de energía eléctrica;
- c) un conjunto de N_{ra} canales aleatorios, que son menos costosos que los N_f canales para **MVNO** y pueden ser usados determinísticamente solamente si dichos canales no han sido usados por usuarios de telefonía celular. $N = N_r + N_f + N_{ra}$.

Se supone un modelo de tiempo ranurado (time slotted), con un time slot en el que transmitirá un **SM** con tecnología celular pueda transmitir la información del consumo de energía. En un cierto intervalo de tiempo, pueden haber n_c canales usados por usuarios de telefonía celular, garantizando que $n_c \leq N_r + N_{ra}$. También se puede programar n_a SMs para ser activos durante ese período. De ellos solo n_a^* transmitirá con $n_a^* = \min\{n_a, N - n_c, N_f + N_{ra}\}$.

Si el **SM** está programado para transmisión utilizando un canal reservado, transmitirá con éxito en todo momento, Sin embargo, si el **SM** está programado para transmisión a través de un canal aleatorio, podría transmitir o no transmitir con una cierta probabilidad. El modelo supone que la asignación de time slot y canal es determinada por el operador celular primario que puede decidir time slots para transmisión de medición inteligente ya sea como operador primario o secundario, por otra parte lo importante será conocer la disponibilidad de los canales aleatorios que pueden reducir el costo de los canales arrendados.

La programación o *Scheduling* de transmisión es definida por un algoritmo de programación *SchAlg*, el cual asigna cada **SM** el segmento de tiempo (time slot) y el canal a ser usado en la transmisión.

El trabajo presentado supone que los time slots son agrupados en frames (tramas) de T time slots cada uno. La programación es recalculada para cada frame y puede ser representada por una variable binaria $x_{h,t,k} \in \{0, 1\}$. $x_{h,t,k} = 1$ si el k^{th} **SM** se le asigna un time slot t en un canal h para transmitir.

Esta programación debe garantizar algunas restricciones tales como:

$\sum_{h=1}^N \sum_{k=1}^M x_{h,t,k} \leq 1; \forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$, por ejemplo solamente solo un **SM** es programado en el mismo canal y en el mismo time slot a la vez.

$\sum_{h=1}^N \sum_{t=1}^T x_{h,t,k} \leq 1; \forall k \in \{1, 2, \dots, M\}$, advierte que un **SM** es programado para transmitir en un solo time slot y un solo canal. El modelo supone también que cada **SM** tiene un time slot preferido para transmitir t_k , equivalente a una cierta fase para transmitir en la trama. Sin embargo, el **SM** puede transmitir en un time slot diferente, dentro de una ventana de transmisión $\{t_k - W/2, t_k + W/2\}$ con una longitud de ventana W para ayudar a evitar la congestión, existente cuando el tiempo de transmisión es muy corto y no se encontraría canales disponibles.

Se define la variable $z_{h,t,k} \leq x_{h,t,k}$, $z_{h,t,k} \in \{0, 1\}$ la cual representa si **SM** transmite eficazmente la información en el canal y time slot programado. Se define un conjunto de tramas o frames para la transmisión $F \in \{1, 2, \dots\}$, así como la cantidad $z_{f,k} = \sum_{h=1}^N \sum_{t_f=1}^T z_{h,t,k}$ como la variable indicador que es igual a uno si el k^{th} **SM** efectivamente transmitió en la trama o frame f . Note que t_f es el time slot relacionado al frame f .

Se define el rendimiento promedio de la transmisión del **SM** como: $TH_k = \lim_{F \rightarrow \infty} \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F z_{f,k}$. También se define rendimiento total de la celda para **SM** como: $TH = \lim_{F \rightarrow \infty} \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^M z_{f,k}$. En un caso ideal, los valores podrían tener un valor límite de $TH_k \rightarrow 1$ y $TH \rightarrow M$. Se usa esas cantidades como una métrica de performance.

El objetivo de la presente etapa es encontrar la relación entre los indicadores de desempeño definidos y los parámetros del sistema tales como: N , N_f , N_r , N_{ra} and M . Como se describe en [94], los valores elegidos para el impacto de los parámetros en las métricas de rendimiento general.

El presente algoritmo de solución *SchAlg* está basado en un problema de **Matching** con mínimo peso, donde los diferentes **SM** son los nodos que podrían ser asignados a una combinación particular time slot/canal, a esto denomina bloque de recursos o *resource block*. Esta asignación puede ser vista como

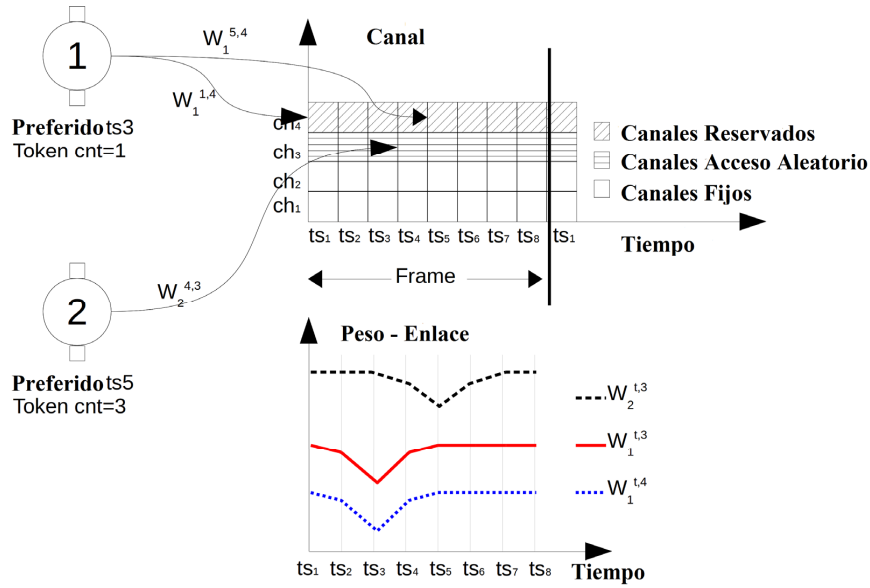


Figura 4.2: Modelo para asignación de canales en AMI. Fuente Autor

un grafo *bibartito* con SMs en un subconjunto y los RB son el otro subconjunto. Los pesos y puentes entre nodos son definidos a continuación. Se define la frontera que existe entre el k^{th} SM y el RB (h, t) si t está entre la ventana de transmisión del SM. El peso es representado por $W_k^{t,h}$ y es definido acorde al siguiente criterio:

- Un peso w_k^t que depende de la distancia entre el time slot t y el time slot preferido t_k . Este peso es mínimo para el t_k el valor aumenta con la distancia a t_k .
- Un peso w_k^h que depende del canal elegido. Si h está en el conjunto de canales fijos, tiene un valor más bajo, y si h está en el canal aleatorio establecido tiene un valor mayor.

- Un peso justo w_k que trata de forzar una asignación justa de recursos a los SMs. Es un valor basado en un token. Si un SM no ha transmitido en varias tramas, suma un token para cada una de las tramas donde no hubo transmisión. Cuando el SM transmite con éxito, no añade ningún valor. El valor w_k es la inversa del número de cantidad acumulada de tokens. El SM con el mayor número de transmisiones tendrá el mayor peso.

El valor final del peso se calcula a través del producto de los tres pesos y le da un valor inferior al SM con el rendimiento más bajo. También tendrá el valor inferior a los intervalos de tiempo más cercanos de segmento de tiempo de transmisión preferido y será menor para los canales reservados. La figura 4.2 presenta el proceso de cálculo y una perspectiva clara de los SM que compiten para transmitir sobre canales de acceso aleatorio o los canales reservados (prepago) y la relación con canales fijos (servicio celular), para esta figura tS representa el número de time slot dentro del frame y $W_1^{1,4}$ la ventana 1 con el time slot 1 y el canal 4. Finalmente se resuelve el problema de matching como un problema de matching bipartito de mínimo peso basado en el algoritmo Húngaro, el cual define la programación final (scheduling). Esto es aplicado y el valor $z_{h,t_f,k}$ es calculado como un ingreso al próximo frame y esto se resuelve iterativamente en los subsiguientes frames.

A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo 1.

Algoritmo 1 (*SchAlg*) Algoritmo de Programación (Scheduling) en el frame f

- Paso: 1 Calcular $W_k^{t,h} \forall k \in \{1, \dots, M\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall h \in \{1, \dots, N\}$;
- Paso: 2 Conjunto $x_{h,t_f,k}$ desde la solución de Mínimo peso del problema Emparejamiento Bipartito ;
- Paso: 3 Resolver la ocupación del canal celular durante el frame;
- Paso: 4 Conjunto $z_{h,t_f,k}$ de ocupación del canal;
- Paso: 5 **forall** $k \in \{1, \dots, M\}$
 Calcular $z_{h,t_f,k}$
 if $z_{h,t_f,k} \approx 1$ **then** $Token_k ++$;
endforall
-

4.3. Problema: Despliegue de Redes Inalámbricas Heterogéneas

Si se consideran las desventajas encontradas con una única tecnología para dotar de comunicación a la infraestructura de medición avanzada, resulta importante encontrar una solución híbrida que permita mejorar la confiabilidad de conectividad de los medidores inteligentes a través de una propuesta íntegra con redes inalámbricas.

En esta sección se direcciona una red WHN para medición inteligente de energía eléctrica a través de un modelo heurístico para optimizar el número de UDAP y sus localizaciones en un escenario que intenta ser flexible, escalable y factible para un despliegue en contraste a un escenario de tecnología única. Es importante denotar que en esta sección un UDAP es considerado como otro dispositivo diferente a un SM

4.3.1. Óptimo Enrutamiento de Redes WHN

El modelo heurístico que se presenta en esta sección garantiza la cobertura de SM, considerando restricciones de capacidad y costos. El modelo es capaz de generar a través de un conjunto de algoritmos el cumplimiento de los requisitos así como el tamaño de la red, de una manera óptima o cuasi óptima. El rendimiento del modelo es evaluado en términos de la eficiencia cuando la densidad de SMs varía, esto significa que el modelo se adapta y dispone los recursos requeridos (es decir, el número de UDAP) a diferentes tamaños de población de SMs.

Para ésta heurística se considera a la descripción de WHN descrita en la sección 3.2. Cada UDAP conecta a un número de SMs y los SMs pueden emplear multi-salto para lograr su conectividad con un máximo S de saltos. Los sitios candidatos son georeferenciados para instalar un UDAP, estos son naturalmente emplazados en ubicaciones donde existe postes de alumbrado público instalado (en este caso en las esquinas de cada barrio). Se coloca todos los elementos, es decir, SMs (con posiciones aleatorias), BS y UDAPs candidatos, en un mapa OSM proporcionado por [Openstreetmap - Sitio web de descarga de mapas](#). La distancia entre elementos se calcula en base a la formulación de [Haversine](#).

En el ajuste anterior, el objetivo planteado es obtener un árbol de conectividad con el enrutamiento requerido para cada componente de AMI, de tal

manera que se provea cobertura para un número N de SMs, conectado a un número M de UDAPs y un número K de estaciones base celular a donde se conecta cada UDAP. Se supone que cada UDAP tiene una capacidad C , que puede variar dependiendo de la tecnología inalámbrica que se está empleando.

Un modelo de árbol de expansión mínimo que se basa en el concepto del algoritmo PRIM, y en teoría de grafos, se emplea para encontrar el subconjunto de aristas que formarán un árbol con todos los vértices. Durante el proceso, se introduce la restricción del número de saltos S . En cada iteración, el algoritmo está incrementando el tamaño del árbol, partiendo de un vértice UDAP inicial, y añadiendo vértices SMs sucesivos, de manera que las distancias entre UDAP y SM son mínimas. La distancia soportada también debe depender de la tecnología inalámbrica empleada por cada elemento de red.

En los algoritmos 2 y 3, se describe el modelo denominado *Optimal Planning for Deployment of Wireless Heterogeneous Network (OPDWHN-AMI)*. La tabla 4.1 contiene la notación de variables usada en los algoritmos.

Tabla 4.1: Notaciones-Variables

\mathbb{I}	El conjunto de internet
\mathbb{B}	El conjunto de estaciones base (EB)
\mathbb{U}	El conjunto de UDAPs
\mathbb{S}	El conjunto de smart meters (SMs)
C_m	Capacidad de UDAPs
G	Matriz de Costo
$dist$	Distancia de Haversine entre recursos
Cov	SMs cubiertos
ψ	Steiner tree
U_r	Set Cover
N_s	Conjunto de SMs conectados
ψ_i	Conjunto de SMs para UDAP; Directo; multisalto
$noCon$	SMs desconectado
N_{saltos}	Número de saltos
N_{hmax}	Max # saltos
d_{min}	Mínima distancia
N	Variable a iterar i - de SM
M	Variable a iterar j - de UDAP
K	Variable a iterar k - de EB
U_j	Sub conjunto de U

El algoritmo principal 2 denominado *OPDWHN-AMI* en el **Paso: 1** se contempla el ingreso de las variables referidas a las coordenadas geo-referenciadas para la planeación SM; UDAP; , también se considera la capacidad de cada UDAP en términos del número de SM que puede albergar cada UDAP activo. A continuación en el **Paso: 2** se identifica los SM que han sido cubiertos en el

modelo. En el **Paso: 3** se genera un árbol de mínima expansión basado en el algoritmo de PRIM, es este caso se llama a un función que se encuentra detallada en el 3, a continuación en el **Paso: 4** se resuelve el problema de SetCover mediante el uso del algoritmo de Greedy. En el **Paso: 5** se integra el proceso de inteligencia de la heurística que mediante el algoritmo de [Dijkstra](#) permite encontrar el camino más corto pero incluyendo un número de saltos para la red inalámbrica que se desee. El **Paso: 6** genera el árbol final que integra a través de multi-salto a [SM](#) y usa el [UDAP](#) que permita integrar el mayor número de [SM](#) pero respetando su capacidad.

Algoritmo 2 OPDWHN – AMI Óptima planeación para despliegue de redes inalámbricas heterogéneas en AMI

Paso: 1 Entrada: *conjunto* Internet
conjunto U de UDAPs candidatos, $M = ||U||$
conjunto B de BS, $K = ||B||$
conjunto S de SMs, $N = ||S||$
 parametro C_m , capacidad de UDAPs
 $N_s(j) = 0, \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}, Cov=0$

Paso: 2 Salida: $Cov/||S||$, $avg(N_s)$

Paso: 3 **forall** $U_j, j \in \{1, \dots, M\}$
 $\psi_i = \text{calculando} - \text{arbol}(U_j, S, C_m);$

Paso: 4 $U_r = \text{SetCover}(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M)$

Paso: 5 $[\text{proxsalto}, \text{costo}] = \text{Dijkstra}(G, I)$

Paso: 6 **forall** $SM \in S$
nodo = SM;
while *nodo* $\in S$
 $\text{nodo} = \text{proxsalto}(\text{nodo})$
endwhile
 $N_s(\text{nodo}) = N_s(\text{nodo}) + 1$
if *nodo* $\in U$
 $Cov ++$
endif
endforall
endforall

Paso: 7 retorna $Cov/||S||$

Paso: 8 retorna $avg(N_s)$

El 3 determinado por la función ψ permite el cálculo del árbol de mínima

expansión para cubrir los **SM** de manera inicial antes de resolver el Setcover el algoritmo 2 en el **Paso: 4**, para esto en el **Paso: 1** es necesario ingresar las coordenadas de todas las variables **SM**; **UDAP**; acompañadas del radio de los **UDAP** y de su capacidad, es decir del número máximo de **SM** que puede aglutinar. En el **Paso: 2** no entrega el árbol de mínima expansión. En el **Paso: 3**, se inicia con un número de saltos en 1 de tal manera que primera analiza cuantos **SM** se encuentra a un paso y permite la conectividad con un **UDAP**. En el **Paso: 4** se verifica que los **SM** no superen el número de saltos permitidos al igual que tampoco debe superar la capacidad de cada **UDAP**, para esto va revisando en función del radio del **UDAP** si todavía es factible adicionar un nuevo **SM**, este proceso se lo realiza de forma iterativa hasta que se haya verificado todo los **UDAP**. Se finaliza en el **Paso: 5** con la entrega del árbol de mínima expansión considerando multi-salto entre los **SM**.

Algoritmo 3 Función ψ - cálculo del árbol(U_j, S, C_m)

Paso: 1 Entrada: (U_j, S, C_m)

Paso: 2 Salida: ψ

Paso: 3 Inicializar: $N_{saltos} = 1, \psi = \{U_j\}$

$noCon = S$

$Ns(U_j) = \emptyset$

Paso: 4 **while** $||\psi|| < C_m \ \&\& \ N_{saltos} < N_{hmax}$

for $i \in \psi$

for $j \in noCon$

$d = dist(i, j)$

if $d < d_{min} \ \&\& \ Ns(i) + 1 \leq N_{saltos}$

$a = i, b = j, d_{min} = d$

endif

endfor

endfor

if $d_{min} < inf$

$\psi = \psi \cup \{b\}$

$noCon = noCon \setminus \{b\}$

$Ns(b) = Ns(a) + 1$

else

$N_{saltos} = N_{saltos} + 1$

endif

endwhile

Paso: 5 retorna ψ

Una vez completada la etapa **PRIM**, se procede a seleccionar el número mínimo de UDAPs, de modo que los SM se agrupan según las restricciones de capacidad y número de saltos. Para solucionar este problema de Setcover, se emplea un algoritmo de Greedy que permite seleccionar una solución cuasi-óptima en cada paso, con la intención de lograr una solución óptima general. El objetivo es que el mayor conjunto de SM se cubran en una red sin bucles.

La etapa final consiste en encontrar el camino para el enrutamiento entre elementos sujetos a la restricción en términos de distancias entre elementos de red. Para generar el árbol de expansión mínimo, se emplea el *Steiner Tree*: una heurística aplicada a los problemas de optimización combinatoria. El problema se define como NP-complete: la búsqueda de la distancia más corta entre el conjunto de UDAPs, SMs y BS. Se define un conjunto de vértices V , un UDAP o SM vértice se introduce dependiendo de su ubicación y cercanía a otros SMs. En otras palabras, los vértices (es decir, UDAP o SM) serán los puntos de Steiner, y se formarán varios árboles para el conjunto de elementos inicialmente planteados en el modelo. Para calcular las trayectorias más cortas se emplea la heurística de Dijkstra, de modo que la matriz de costes, que representa las distancias, se utiliza para encontrar la trayectoria desde la oficina central de una empresa eléctrica hasta cada SM.

4.3.2. Problema de flujo de múltiples recursos

En esta sección se describe la formulación del problema de optimización para resolver un flujo de múltiples recursos **Capacitated Multicommodity Flow (CMCF-AMI)**. En esta sección se considera que un SM puede tener el comportamiento de un UDAP debido que el hardware permite insertar una tarjeta de comunicaciones con tecnologías de naturaleza inalámbrica como: celular, Wi-Fi, IEEE 802.15.4g. El modelo presentado permite parametrizar cada tecnología inalámbrica adicional a la celular.

En primer lugar se requiere especificar la notación de las variables y parámetros que incidirán en la formulación del problema, cada parámetro se detalla en la tabla 4.2

La función objetivo está definida por Eq. 4.1

$$\min \sum_{e \in E} \sum_{i \in F} \sum_{l \in R} C_e X_{i,l} R_{i,l}^e \quad (4.1)$$

La Eq. 4.1 está compuesta por tres sumatorias globales que involucran a enlaces, flujos y rutas. Los elementos tomados en cuenta son el costo del enlace,

Tabla 4.2: Notaciones CMCF-AMI

e	Enlace
i	Flujo
l	Ruta (path)
C_e	Costo enlace
$X_{i,l}$	Flujo i a través del camino l
$R_{i,l}^e$	Ruta del flujo i en el enlace e
φ_i	Flujo i
Cap_e	Capacidad del enlace

el flujo i a través de la ruta l y finalmente la ruta del flujo i en el enlace e .

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

- La suma de flujos i a través del camino l debe ser igual a φ_i y se evalúa como:

$$i) \sum_{l \in \mathcal{R}} X_{i,l} = \varphi_i \quad \forall i \in \mathcal{F} \quad (4.2)$$

- La suma definida para la asignación y el enrutamiento debe ser menor o igual a la capacidad del enlace y se define como:

$$ii) \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{l \in \mathcal{R}} X_{i,l} R_{i,l}^e \leq Cap_e \quad (4.3)$$

- La suma definida para la asignación del recurso, el enrutamiento y el enlace sin tener en cuenta la capacidad debe ser cero y se detalla a continuación:

$$iii) \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{l \in \mathcal{R}} X_{i,l} R_{i,l}^e + Z_e - Cap_e = 0 \quad (4.4)$$

- El flujo en cada ruta debe pertenecer a la ruta si el enlace está activo y se define en:

$$x_{i,l} \begin{cases} \mathcal{R}; \\ \mathcal{Z}\{0, 1\} \end{cases} \quad (4.5)$$

La heurística basada en la generación de columnas permitirá encontrar cuál ha sido el uso del enlace y su ocupación en porcentaje. En la figura 4.3, se advierte el comportamiento para un conjunto N=16 de Medidores Inteligentes

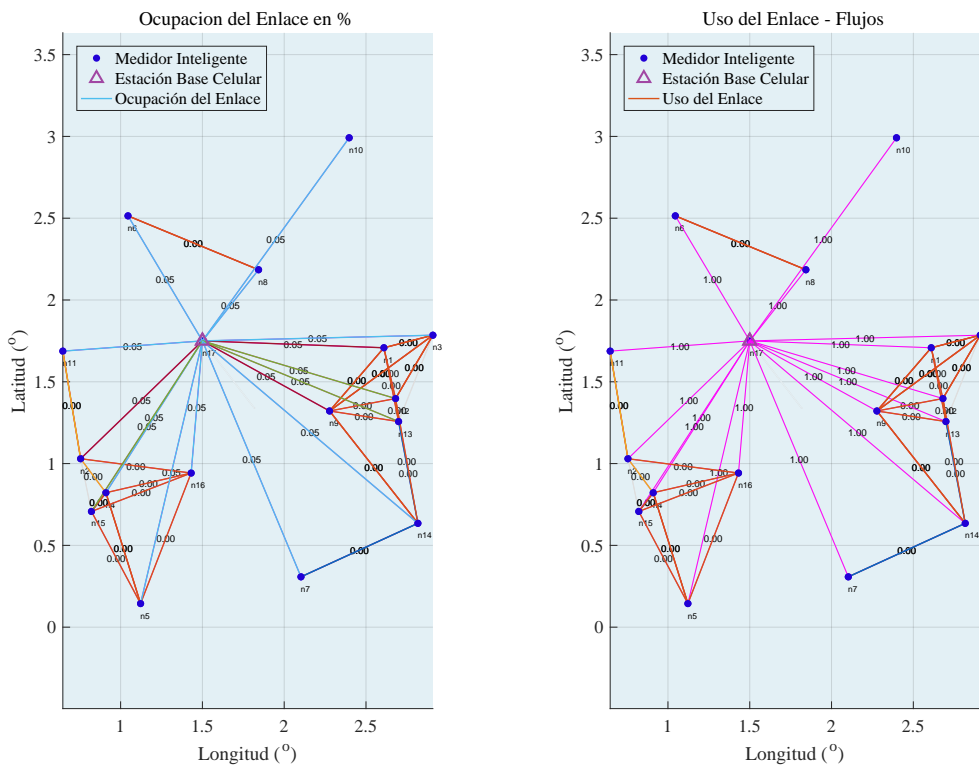


Figura 4.3: Ocupación y uso del enlace basado en generación de columnas. Fuente Autor

Para ejemplificar de una manera clara el despliegue de redes inalámbricas heterogéneas requeridas para cubrir a los SM ubicados en los hogares de cada cliente del sistema eléctrico, se debe diseñar no solamente un enrutamiento óptimo con el menor costo por uso de sus recurso sino que además debe permitir la escalabilidad de seguir adicionando nuevos usuarios hasta completar la totalidad de clientes de un sistema eléctrico o hasta que la empresa de distribución eléctrica lo disponga. Por lo tanto, es necesario encontrar la mejor combinación de las variables que se conjugan en esta problemática, es decir las variables necesitan complementarse entre sí. Es así que para encon-

trar el equilibrio en el despliegue de medidores inteligentes con una tecnología inalámbrica que intente reducir los costos al mínimo es importante lograr un balance de los flujos de información que viajarán en cada enlace que pudiera generarse; así, en términos matemáticos, la no linealidad hace que el diseño de WHN no sea un problema trivial y la heurística implementada contempla una inteligencia que permite lograr este diseño involucrando a la metodología de la generación de columnas. Si se define inicialmente al conjunto de combinaciones de N medidores inteligentes con una tecnología inalámbrica y los posibles enlaces que se incrementan conforme crece la población de medidores inteligentes. Para hacer frente a este problema el método de generación de columnas propone dividir el trabajo de búsqueda de los mejores medidores inteligentes que aporten a la solución conectados de forma directa a una estación base celular y que a manera de clúster aglutine a otros medidores inteligentes provenientes de multi-salto empleando tecnología WiFi. Para esta tarea se ha diseñado un algoritmo que realiza el papel de observador principal del problema. Este algoritmo mira los diferentes medidores inteligentes que mejor aportan a la solución cuando ingresan al algoritmo denominado problema primario; este algoritmo tiene como misión encontrar lo mejor que se pueda con lo que se posea en el instante de partida; posterior a esta tarea el mejor valor encontrado en el problema primario ingresa al problema secundario para encontrar el enlace con mayor congestión y lo elimina de las posibles opciones de enrutamiento, entregando así una nueva opción o variación al enrutamiento original y procede a ejecutar una vez más el problema primario hasta encontrar la mejor opción con el mejor balance de flujo a través del nuevo enrutamiento ensayado. Pero entonces cabe la pregunta si existe un gran avance en este proceso respecto de la anteriormente logrado, ¿existe un nuevo aporte?, se puede decir que evidentemente lo es, en primer lugar, porque desde el observador principal puede optimizar el balance de los flujos de cada enlace probando casi todas las combinaciones posibles. De suma importancia resulta el trabajo del problema primario que se encarga de encontrar la solución dual y primal a través de un método simplex que a partir de la función objetivo que entrega al observador principal le permite tomar una decisión de seguir mejorando o no el balance de los flujos en la ruta presentada. El problema secundario no es menos importante debido a que encuentra el SM congestionado y permite que la ruta pueda evaluar si existe una mejor opción con un balance de flujos de mayor equidad. Esta división de problemas en observador principal; problema primario y problema secundario ha permitido grandes reducciones de tiempos de cálculo de un escenario de optimización. La eficiencia del mé-

todo de generación de columnas se presenta cuando el número de variables es muy grande, para este caso en el enrutamiento de redes inalámbricas heterogéneas y donde se asigna una variable para cada ruta posible. Así el número de variables pueden ser interpretadas como de orden factorial contemplando a [SM,UDAP](#) y que deben ser conectados para obtener un proceso más fácil de interpretar reduciendo la dimensionalidad de las variables. En la heurística se advierte que el observador principal solo se ocupa de presentar las variables al problema primario que se encarga de dividir en un subconjunto de variables. Algebraicamente esto significa que las variables se dividen en grupos, es decir el problema primal denomina a sus elementos como columnas generadas y los del problema dual o segundo grupo de columnas no generadas. El problema primal del problema primario únicamente conoce la formulación correcta sin columnas no generadas, así el subproblema propone una nueva variable para añadir a la formulación y de esta manera resulta una modificación del problema primal la adición de una columna a la matriz. Dentro del método existe un análisis de sensibilidad, de esta manera en la programación lineal se identifican las congestiones de la optimización, para esto se usa el concepto de dualidad, es decir dadas las variables duales óptimas el problema primal puede relacionar la mejora potencial de una variable no generada, observando el costo de la variable y la columna de la matriz correspondiente a esa variable. Entonces se puede decir que la variación del valor objetivo cuando se adiciona la variable x a la base dada por el costo reducido y donde y es la variable óptima dual del problema primario. Cabe mencionar que este costo reducido no da la información completa ya que podría no ser capaz de realizar varios pasos en la dirección de encontrar una mejora.

En la figura [4.4](#), se presenta el multigrafo provocado a través del proceso heurístico determinado entre el algoritmo del problema primario y el problema secundario.

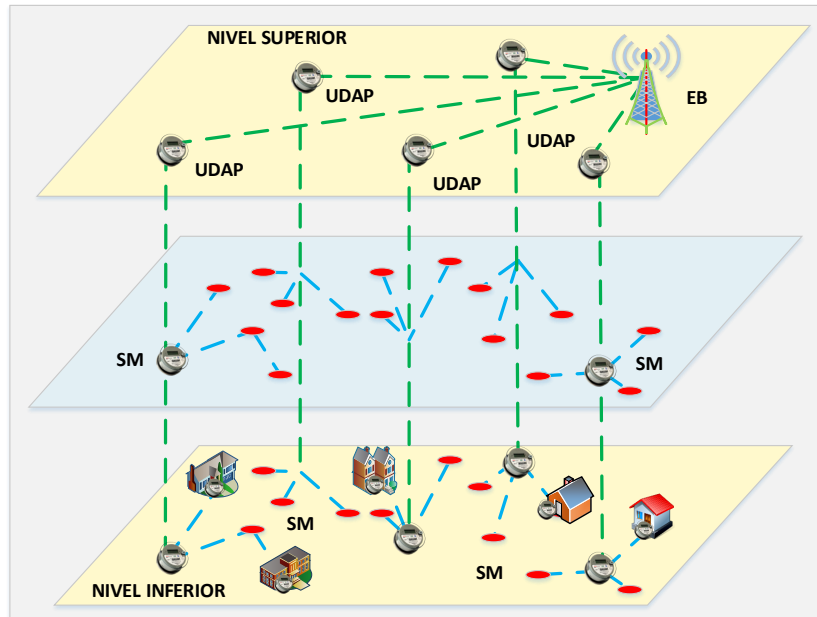


Figura 4.4: Multigráfico - Generador de Columnas Fuente Autor

El concepto de dualidad indica que la solución base es más importante que la presente en los extremos. Por otro lado, el multigráfico indica que es demasiado grande un escenario para ser implementado en su totalidad, pero a través de la programación lineal se obtiene un buen resultado en función de las restricciones que han sido tomadas en cuenta. De esta manera, aunque el método simplex no tiene conocimiento de todo el grafo, a través de la función [Asociado al Método Simplex - Programación Lineal](#) puede enumerar a los SMs vecinos de un SM para encontrar el mejor SM siguiente a ser visitado. El método eventualmente, termina en un SM donde ambos números son cero, es decir no tiene otro SM a ser visitado, en cuyo caso se dispone de una solución base que es tanto primal como dual factible. Es decir la solución base es necesariamente primal y dual óptima.

El método de generación de columnas disminuye el número de restricciones de todos los SMs, en este caso algunos SMs se pueden constituir en via-

bles duales. Entonces el papel importante del subproblema será encontrar un conjunto de SMs que se puedan añadir de tal manera que el SM óptimo del problema primal ya no es un extremo dual.

A medida que se aumenta los SMs se logra una escalabilidad en los escenarios de planeación y se agregan un número mayor de variables, razón por la cual el método de generación de columnas coadyuva a una solución más rápida, este tipo de problemas es un ambiente idóneo para aplicar el método de generación de columnas.

En el presente problema se tiene contempladas variables como: el número de SMs, las restricciones y umbral de la función objetivo declarada como sensibilidad, en este caso si el umbral es muy bajo la heurística tomará un tiempo muy grande para resolver un programa lineal entero.

Para resolver este particular del umbral es posible encaminar a reducir el número de SMs que van a ser incrementados en el escenario y de esta manera enfrentar el problema con el método de generación de columnas.

A continuación se detallan los pseudocódigos de la heurística denominada **CMCF-AMI** y las subfunciones que se han requerido. En el algoritmo 4 se presenta el observador principal que expresa la inteligencia de la heurística, algoritmo que a su vez llama a las subfunciones que resuelven el problema primario y presentado en el algoritmo 5 que a través del método simplex (revised_simplex) obtiene el proceso del método de generación de columnas y el problema secundario presentado en el algoritmo 6 que se encarga de varias las topologías requeridas a partir de encontrar enlaces congestionados y definir otras opciones que sean factibles. El problema secundario ha requerido de dos procesos adicionales: el primero presentado en el algoritmo 7 encargado de generar las matrices y pesos para capacidad, costo, distancias y enlaces, las mismas que serán requeridas desde el algoritmo 8 encargado de entregar las topologías nuevas al problema secundario. Las variables empleadas en el proceso heurístico se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Notaciones

Variable	Definición
$Coord_SM, Coord_EB$	Coordenadas SM y EB
$radio_WiFi, radio_Celular$	Radio de cobertura WiFi, Celular
$WiFi, Celular$	Índices
$super$	Vector de SMs con doble tecnología
B	Base factible inicial método simplex
C	Vector de primera solución básica factible
$conf.\{capacidad\ costo\ costodist\ factor\}$	Vectores: Restricciones
obj	Valor de la función objetivo en cada iteración
$dist$	distancia de Haversine
$topo$	Topología inalámbrica
ind	Índice referido al SM
$enlace_disp$	Conjunto de SM factible celular
$temp$	Variable temporal
M	El número total de EB
N	El número de SM
G	Matriz de Conectividad
φ	Problema Primario: $vobj, x, y, Base, topo$
Ψ	Problema Secundario Nueva topología ($topo$)
Υ	Matrices: $dist, G, CostoDist, CostoEnlace, Cap$
Φ	Topología: $topo, conf$
x, y	Solución primal, dual del método simplex
Base	Conjunto de elemento factibles
CostoDist	Costo en relación a la distancia
CostoEnlace	Costo por cada Tecnología
Agregado	Variable binaria 1: agregó nodo 0: no agregó nodo
Cap	Matriz de Capacidades por cada nodo
$vobj$	vector función objetivo
K	Factor de Incremento relacionado con la distancia
$pred$	Path árbol predecesor función Dijkstra
E	Conjunto de Enlaces
A	Matriz generación de columnas
e_cong	Enlace congestionado
$path, nodo$	Conjunto de SM de una ruta, Índice de SM
CostoB	Matriz de Costos de la topología
SM_celular	Índices de SM con tecnología celular
Óptimo_SM_celular	Índice óptimo de SM con tecnología celular
$costototal$	Costo total del enlace
p	Enlace a ser descartado por congestión
Costo	Vector: Factor de Costos

Algoritmo 4 Algoritmo CMCF-AMI - Observador Principal

Ingreso: Coord_SM,Coord_EB,radio_WiFi, radio_Celular

Salida: *Optimo_SM_celular*Inicializar: *conf.capacidad*[WiFi,Celular], *conf.costo*[WiFi,Celular],
conf.costodist[dist, costo], *topo*=Árbol_multigrafo, *vobj*=[], *ind*=1; *flag1*=1;
flag2=1, *flag3*=1

Paso: 1 **while** *flag1*==1
 while *flag2*==1
 if *dist(ind) < radio_Celular*
 enlace_disp = ind; flag2 = 0;
 else
 temp = [temp ind]; ind = ind + 1; temp = [temp inf];
 flag2 = 1;
 endif
 endwhile

Paso: 2 **while** *flag3* > 0
 if *topo* == 0; *Y = [topo conf]; endif*
 $\varphi = [obj, x, y, Base, topo]; vobj = [vobj - obj]$
 if *obj* == 0; *flag1 = 0; flag2 = 0; flag3 = 0; break; endif*
 $\Psi = [topo]$
 endwhile
endwhile

Paso: 3 **if** *ind* < ||Coord_SM||
 goto Paso : 1; **else break; endif**

Paso: 4 *SM_celular = min(vobj); enlace_disp = super;*
 $Y = [topo conf]; flag4 = 0$
 temp = temp \ {SM_celular}; to = to \ {enlace_disp};
 while *obj* ~ = 0
 $ind(to(1,1)); enlace_disp = \cup (enlace_disp, ind);$
 $Y = [topo conf]; flag4 = 1$
 while *flag4* > 0
 $\varphi = [obj, x, y, Base, topo]; vobj = [vobj - obj];$
 $\Psi = [topo]; SM_celular = min(vobj);$
 if ||*ind*|| < ||Coord_SM||; **goto** Paso4; **else break; endif**
 endwhile
endwhile

Paso: 5 *Retorna Optimo_SM_celular = SM_celular(min(vobj))*

La función del algoritmo 4 es tomar decisiones sobre los valores de la función objetivo de las topologías resultantes del proceso. Por lo tanto, las variables de ingreso describen la característica de la topología. Aquí se encuentran las coordenadas de cada SM, restricciones de radios de cobertura tanto para WiFi como para celular, restricciones de costos y capacidad y finalmente los costos por enlaces, que dependerán de las distancias. En el **Paso: 1** se habilita enlaces cuyas distancias, expresadas en metros, no supere la distancia máxima permitida celular. Si la distancia no supera, los índices de las coordenadas se almacenan en la variable *enlace_disp*, caso contrario se almacenan en una variable temporal *temp*. Posteriormente en el **Paso: 2** se genera las matrices de conectividad del multígrafo contenidas en la variable *topo*. A continuación, se hace los cálculos de los costos por distancias y costos por cada tipo de enlaces. Una vez generadas las condiciones iniciales del problema se ingresan los valores obtenidos en el algoritmos 5, el mismo que se encargara de generar una nueva topología con su respectiva función objetivo. Posteriormente esta nueva topología se ingresa como parámetro de entrada en el algoritmo 6 el cual resuelve y arroja un nuevo valor como función objetivo. En el **Paso: 3** se lleva a cabo un proceso de verificación de la dimensión del vector *ind* puesto que su longitud debe ser menor o igual a la cantidad de SM del escenario a trabajar. Si esta condición se cumple el algoritmo regresa al **Paso: 1** hasta realizar un barrido con todos los SM del escenario para determinar el SM idóneo de arranque para el despliegue, caso contrario pasa al **Paso: 4**. Una vez que se ha obtenido una exploración íntegra del escenario con sus respectivas funciones objetivos, se determina el criterio de parada del algoritmo propuesto. En este **Paso: 4** se selecciona al índice que contiene la menor función objetivo, logrando así determinar el SM idóneo de inicio para el despliegue. Posteriormente se añadirán los SM siguientes que aporten a la topología. En el **Paso: 5** retorna la variable que contiene al índice del SM óptimo y la topología resultante. Por lo tanto, el observador principal verifica los valores objetivos del problema primario φ y secundario Ψ , si encuentra valores reducidos toma la variable e ingresa en el problema primario y lo resuelve obteniendo un nuevo valor objetivo. Este nuevo valor es retornado al problema secundario arrojando un nuevo valor objetivo y el observador principal verifica hasta que la función objetivo cumpla un mínimo aceptable.

Algoritmo 5 Algoritmo Problema Primario - φ Ingreso: *topo*Salida: *obj, x, y, Base, topo*Inicializar: $E = \|\textit{topo}\|$; $N = \|\textit{Coord_SM}\|$; $A(N+E)=0$; $\textit{ind}=1$ Paso: 1 **for** $i = 1 : N$ $B(i, 1) = 1$ **for** $j = 1 : \|\textit{topo.nodo}(i).path\|$ $A(i, \textit{ind}) = 1$ $\textit{topo.nodo}(i).\textit{ind}(1) = \textit{ind}$ $\textit{ind} = \textit{ind} + 1$ **endfor** **endfor**Paso: 2 **for** $i = 1 : E$ $B(i + N) = 0$ **for** $j = 1 : \textit{topo}.N$ **for** $k = 1 : \|\textit{topo.nodo}(j).path\|$ $p = \textit{topo.nodo}(j).path(k)$ **for** $m = 1 : \|p\|$ **if** $p(m) == i$ $A(N + i, \textit{topo.nodo}(j).\textit{ind}(i)) = 1 / \textit{topo}.Cap(\textit{topo}.i(i), \textit{topo}.j(i))$ **endif** **endfor** **endfor** **endfor**Paso: 3 $A = [A \quad \textit{zeros}(N, E); \textit{eye}(E)] [\textit{zeros}(N, 1); \quad -1 * \textit{ones}(E, 1)]$ **for** $i = 1 : E$ **if** $(\textit{topo.tipo}(\textit{topo}.i(i)) = 1 \ \&\& \ \textit{topo.tipo}(\textit{topo}.j(i)) = 2 \ \|$
 $(\textit{topo.tipo}(\textit{topo}.i(i)) = 2 \ \&\& \ \textit{topo.tipo}(\textit{topo}.j(i)) = 1);$ $A(N + i, \textit{end}) = -\textit{inf}$ **endif** **endfor**Paso: 4 $A = [A \ \textit{eye}(\textit{size}(A, 1))]$ $C = \textit{zeros}(1, \textit{size}(A, 2)) \ \ \ \ \ \textit{ones}(1, \textit{size}(A, 1))'$ $\textit{Base} = (\textit{size}(A, 2) + 1 : \textit{size}(A, 2));$ $[\textit{obj}, x, y, \textit{Base}] = \textit{revised_simplex}(-C, A, B, 1e-3, \textit{Base})$ $C = \textit{zeros}(\textit{size}(A, 2), 1); C(\textit{end}) = 1;$ $[\textit{obj}, x, y, \textit{Base}] = \textit{revised_simplex}(-C, A, B, 1e-3, \textit{Base})$ Paso: 5 *Retorna* $\textit{obj}, x, y, \textit{Base}, \textit{topo}$

En el algoritmo 5 se ingresa la variable topo. En el **Paso: 1** se procede a descomponer los flujos identificando los caminos de cada racimo. En el **Paso: 2**, en la variable p , se depositan los SM de cada grupo y por último en la matriz A se introducen las capacidades de cada enlace de acuerdo con la topología. Posteriormente en el **Paso: 3** se construye un arreglo de la matriz A en la que se inserta infinito en aquellas posiciones que sí cumplen con la restricción de capacidad de enlace, esto se realiza con la finalidad de no volver a tomarle en cuenta en las próximas iteraciones. Posteriormente en el **Paso: 4** se generan las matrices necesarias que serán parámetros de entrada en el revised simplex el mismo que arroja como resultado la solución inicial factible. Finalmente en el **Paso: 5** se obtiene las variables de salida.

Algoritmo 6 Algoritmo Problema Secundario - Ψ Ingreso: $y, topo$ Salida: Agregado, $topo$ Inicializar: $N = \|topo.N\|; E = \|topo.i\|;$ Agregado=0; $e_cong = \max(y) - N; [topo.i(e_cong), topo.j(e_cong)];$

CostoB=topo.CostoEnlace;

Paso: 1 **for** $i = 1 : \|e_cong\|$ $CostoB(topo.i(e_cong(i)), topo.j(e_cong(j))) = inf$ $CostoB(topo.j(e_cong(i)), topo.i(e_cong(j))) = inf$ **endfor**Paso: 2 **forall** $j = 1 : N$ $nodo = i; path = nodo; costototal = 0;$ **while** $pred(nodo) < topo.internet \& pred(nodo) > 0$ $path = [path \quad pred(nodo)]$ $costototal = costototal + topo.CostoEnlace(nodo, pred(nodo))$ **endwhile** $p = [\quad]; flagA = 0;$ **for** $k = 1 : \|path\| - 1$ $p = [p \quad topo.index(path(k), path(k+1))]$ $flagA = 1$ **endfor** **if** $flagA == 1$ **for** $m = 1 : \|topo.nodo(i).Path\|;$ **if** $\|(topo.nodo(i).Path(j))\| == \|p\|$ **if** $suma(abs(topo.nodo(i).Path(j) - p)) == 0;$ $flagA = 0$ **endif** **endif** **endfor** **endif** **if** $flagA == 1$ $topo.nodo(i).Path(\|topo.nodo(i).path\| + 1) = p;$ $topo.nodo(i).Path(\|topo.nodo(i).path\| + 1) = -1;$ **endif** **endforall**

Agregado= flagA

Paso: 3 *Retorna* Agregado, $topo$

En el algoritmo 6 se ingresan los datos de la topología obtenida en el problema primario y como salida proporciona una nueva topología con la característica que agrega un **SM** nuevo. En los **Pasos: 1 y 2** se hace una verificación de los costos que se vean sujetos a las restricciones del problema. Si los **SM** que se añaden poseen costos dentro de los valores permitidos este algoritmo los añade modificando así la topología. Por lo tanto, al añadir un nodo se ve modificada la topología y por ende la función objetivo. Estos nuevos datos ingresarán nuevamente al problema primario para resolver y arrojar nuevos valores de la función objetivo y finalmente dichos valores serán datos que serán comparados dentro del observador principal. Finalmente, en el **Paso: 3** retorna el **SM** agregado y la nueva topología.

Algoritmo 7 Generador de Matrices - Υ Ingreso: $topo, conf, radio_WiFi, radio_Celular$ Salida: $dist, G, CostoDist, CostoEnlace, Cap$ Inicializar: $n = \|topo.N\|$;

```

Paso: 1 for  $i = 1 : n$ 
    for  $j = 1 : n$ 
         $dist(i, j) = haversine$ ;
        if  $dist(i, j) \leq (radio\_WiFi \parallel radio\_Celular)$ ;
             $G(i, j) = 1; CostoDist(i, j) = dist(i, j)$ ;
             $CostoEnlace(i, j) = conf.factor(topo.tipo(i), topo.tipo(j))$ ;
            if  $(topo.tipo(i, j) = (WiFi, Celular) \parallel (topo.tipo(j, i) =$ 
             $(Celular, WiFi)$ ;
                if  $enlace\_disp \in dist(enlace\_disp \leq radio\_Celular)$ 
                     $K = conf.costodist(conf.costodist > dist(i, j))$ ;
                else
                     $K = inf$ ;
                endif
                 $CostoEnlace(i, j) = CostoEnlace(i, j) * K$ ;
            endif
             $Cap(i, j) = conf.capacidad(topo.tipo(i), topo.tipo(j))$ ;
        endif
    endfor
endfor

```

Paso: 2 *retorna:* $dist, G, CostoDist, CostoEnlace, Cap$

En el algoritmo 7 se realiza el computo de la información requerida para ingresarlos en los algoritmos 4, 5 y 6. En el **Paso: 1** se puede verificar el cálculo de las distancias, empleando la fórmula de [Haversine](#), que se almacenan en una super matriz $dist$. Posteriormente se construye una matriz binaria de conectividad G representada por 0 y 1. Cuando un enlace existe se coloca 1 y cuando no existe enlaces se coloca 0. Las condiciones para que un enlace exista están dados por las restricciones de radio de cobertura tanto como celular y [WiFi](#). Adicionalmente se generan las matrices de costo por cada enlace, costo en función de la distancia y la capacidad máxima admisible en función de la topología.

Algoritmo 8 Generador de Topologías - Φ

 Ingreso: $Coord_SM, Coord_EB, conf, topo$
Salida: $topo, conf$ Inicializar: $Costo = CostoEnlace; Costo(Costo == inf) = 0; Costo = sparse(Costo);$ $topo.index = index; topo.i = i; topo.j = j; p = []$
 Paso: 1 $\Phi = [CostoDist, CostoEnlace, Cap, G, dist]$
 $[i, j] = [i, j] \setminus (G(i, j) == 1)$

 Paso: 2 **for** $k = 1 : \|i\|$
 $index(i(k), j(k)) = k;$
endfor
 $[\sim, pred] = dijkstra(Costo, topo);$
for $i = 1 : topo.N$
 $nodo = i; path\{nodo\} = [nodo]; costototal = 0;$
while $pred(nodo) \leq topo.N + topo.M \ \& \ pred(nodo) > 0$
 $path\{i\} = [path\{i\} \ pred(nodo)];$
 $nodo = pred(nodo);$
endwhile
endfor
for $m = 1 : \|Coord_SM\|$
for $k = 1 : \|path\{m\}(:) - 1$
 $p = [p \ index\{path\{m\}(k), path\{m\}(k+1)\}];$
endfor
 $topo.nodo(m).path = p; topo.nodo(m).ind1 = -1;$
endfor

 Paso: 3 *retorna:* $topo, conf$

El **Paso: 1** del algoritmo 8 se genera el multígrafo que se obtiene como resultado de los algoritmos 4, 5 información contenida en la variable $topo$. En el **Paso: 2** mediante el algoritmo de *dijkstra* se obtiene los *paths* que integran las rutas a graficar físicamente en el mapa geo-referenciado. Finalmente, en el **Paso: 3** se entrega, mediante la variable $topo$ y $conf$ los datos resultantes del multígrafo.

Capítulo 5

Análisis y resultados

5.1. Introducción

El presente capítulo contiene la información detallada de los resultados a los problemas y soluciones planteadas en la sección 4.2 respecto del problema de asignación de canales para determinar el tiempo en el que pueden transmitir información los SM, así como identificar si es factible minimizar los costos por uso del espectro de frecuencia.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en el proceso heurístico que consigue un enrutamiento óptimo de redes inalámbricas heterogéneas a través de un mapa de enrutamiento escalable ya descritos en la sección 4.3.1, en esta etapa se considera la inclusión de UDAP como concentradores de SM.

Finalmente se advierten los resultados del modelo heurístico detallado en la sección 4.3.2 que resuelven el problema considerando los flujos de los múltiples enlaces identificando las demandas de flujo de información desde los SM destino a los SM origen. Para esta etapa se considera que un SM puede comportarse como un UDAP, funcionalidad disponible debido a factibilidad de incluir un módulo de comunicaciones de diferente tecnología inalámbrica en un SM.

5.2. Resultados Generales

5.2.1. Problema de Asignación de Recursos

Para resolver el problema de asignación de recursos detallado en el capítulo 4, se ha planteado N como el número máximo de **SM** que pueden estar en una celda, el modelo de simulación está basado en la carga de usuarios en el sistema; por lo tanto, este parámetro permite calcular en un momento dado si están ocupados tratando de comunicarse desde 0 a N SMs. Por otra parte, el valor actual de los SMs que están conectados serán representados por una cadena de Markov.

El algoritmo considera a las variables Pa y Pd como valores de probabilidad para crear la cadena de Markov, donde Pa indica la probabilidad de que un **SM** inactivo inicie una conexión y Pb la probabilidad que exista un **SM** activo y finalice la conexión.

La simulación considera a N_f canales fijos referidos por un **MVNO**, que serán arrendados, dichos canales son utilizados solamente para transmitir información de medición inteligente de energía eléctrica, con esto se garantiza que cuando no existan canales cognitivos se garantice la transmisión de información desde los **SM**. N_{ra} canales aleatorios, que son menos costosos que los N_f canales para **MVNO** y pueden ser usados determinísticamente solamente si dichos canales no han sido usados por usuarios de telefonía celular y N_r determina la variable de los canales reservados asignados exclusivamente para usuarios de telefonía celular. De esta manera, se divide la capacidad disponible de un operador móvil real, donde N_r son los recursos del operador primario que satisface sus propias llamadas y no se comparte con otro usuario.

Entonces si N_f representa a los recursos que son reservados para el operador virtual **MVNO**, canales que hacen posible la transmisión cuando no es posible usar canales aleatorios y finalmente N_{ra} representa a los canales aleatorios que no son entregados a un **MVNO** a menos que sea requerido por el operador de red; de esta manera, se considera al escenario de simulación basado en cuatro parámetros para operar; primero: los recursos disponibles; segundo: cuantos canales reservados se dispone para el operador principal **MNO**, tercero: los canales reservados para un **MVNO** y cuarto: cuantos canales pueden ser usados de forma oportuna cuando el operador primario no los use, esos valores son N_f , N_r y N_{ra} respectivamente.

El otro parámetro que se analiza es un período de lectura de los SMs, llamado T . Este es el período de lectura puede variar dependiendo de la necesidad de

conseguir información de parte de las empresas eléctricas. En varios proyectos de AMI se consideran tiempos para la medición inteligente de SMS entre 15 y 30 minutos.

En el presente modelo se presenta un número fijo de time slots; por lo que, si se tiene un período muy corto entre lectura y lectura, es posible que no se pueda leer a todos los SMS.

Adicionalmente, se dispone de un período corto y una gran cantidad de canales reservados, el sistema puede operar. De esta manera es un conjunto de interrelaciones entre N_r , N_f , N_{ra} y T .

Así, el modelo busca advertir el comportamiento variable de N_{ra} y N_r , dejando fijo el número total de canales y una cantidad de SMS.

Para ilustrar este estapa del escenario, se procede a fijar N_f a 10, N_{ra} en 7 y N_r en 8; donde, N_r es fijo para los canales reservados por el MNO en relación a los canales aleatorios que serán entregados al MVNO, de esta manera el modelo analiza el comportamiento de N_{ra} y N_r .

En la figura 5.1 se puede observar la relación entre canales aleatorios que puede disponer un MVNO y los canales reservados para telefonía celular MNO, dicha relación está representada por la probabilidad de transmisión de los SMS en el eje z en un determinado instante de tiempo. La simulación presentada en la figura 5.1 ejemplifica un proceso para $N = 10$ (canales); $M = 250$ (SMS) y $T = 40$ (período-minutos). Esto permite concluir que para intervalos de tiempos de lectura de SMS muy pequeños, se torna necesario el uso de canales fijos para medición inteligente ya que no existe disponibilidad de uso de canales aleatorios, debido a que la mayoría de canales reservados para telefonía celular en tiempos pequeños captó la mayoría de canales disponibles, en color amarillo se visualiza la disponibilidad de canales aleatorios cuando el intervalo de tiempo entre lectura y lectura es mayor y en color azul se visualiza la escasez de canales aleatorios en intervalos de tiempos de lectura pequeños.

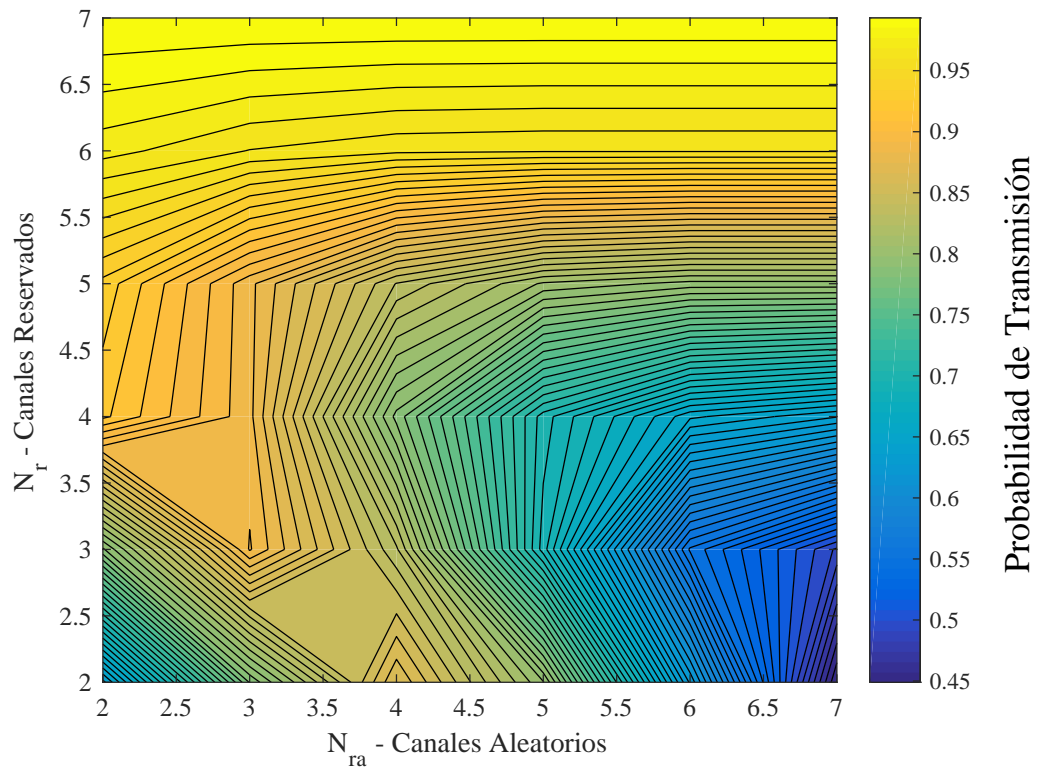


Figura 5.1: Relación N_{ra} Canales Aleatorios Vs N_r Canales Reservados - $N_{ra} = 7$, $N_r = 8$, $N_f = 10$, $M = 250$, $T = 40$. Fuente Autor

En la figura 5.2 se aprecia el comportamiento de la probabilidad de transmisión de los SMs en la línea del tiempo; para este caso la probabilidad de transmisión es alta con un número menor de SMs cuando el período de tiempo es corto; por otra parte, conforme se aumenta el número de SMs se requiere más tiempo para alcanzar una probabilidad de transmisión alta y de esta manera se pueda garantizar que la información no se ha perdido, ésta situación puede generarse cuando existe una saturación o congestión en los canales.

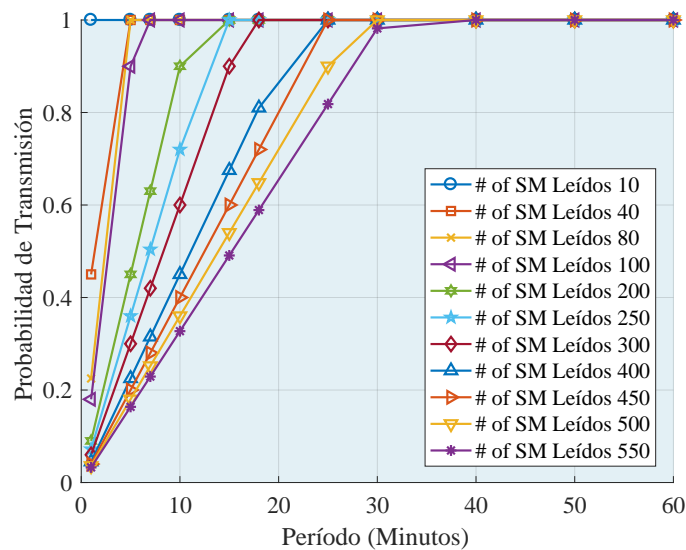


Figura 5.2: Período/Probabilidad de Transmisión vs Número de SMs - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ - Fuente Autor

En la figura 5.3, se representa de otra manera la probabilidad de transmi-

sión, para este caso se indica que existe una relación con el número de SMs, esto se debe a que en un momento dado se genera un grupo considerable de SMs y la probabilidad de transmisión en un corto período de tiempo tiende la curva a cero; adicionalmente cuando el número de SMs es pequeño y se tiene un corto período de tiempo se tiende a una alta probabilidad de transmisión.

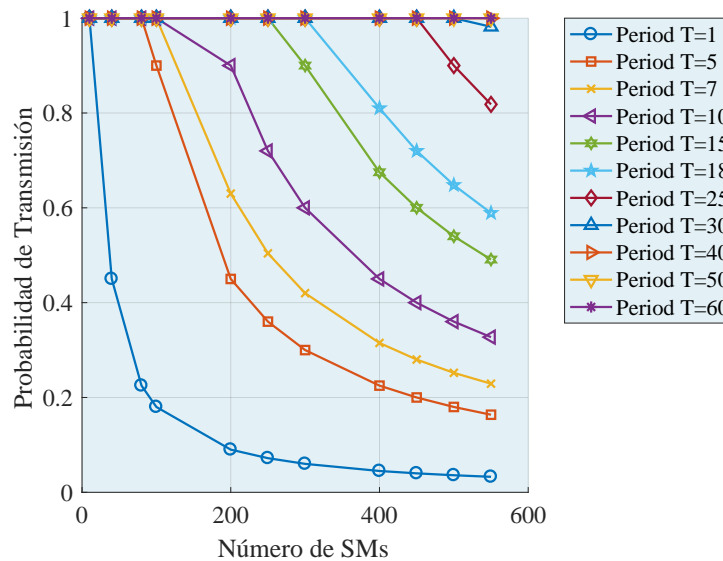


Figura 5.3: Probabilidad de Transmisión vs Número de SMs - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ Fuente Autor

A continuación se realiza un análisis complementario del proceso de simulación con el algoritmo Húngaro que se articula a proceso de Markov y donde se aprecia el comportamiento de rendimiento (*Throughput* Th) y el período de tiempo. En la figura 5.4 se aprecia el rendimiento más alto con una pequeña cantidad de SMs y conforme se incrementa la cantidad de SMs el rendimien-

to disminuye; de esta manera, si se desplaza hacia adelante según la línea del tiempo el Th sigue disminuyendo, esto permite diagnosticar que a más tiempo no hay cambios en el Th , es decir no hay aumento o mejora, este particular se debe a la saturación de los canales.

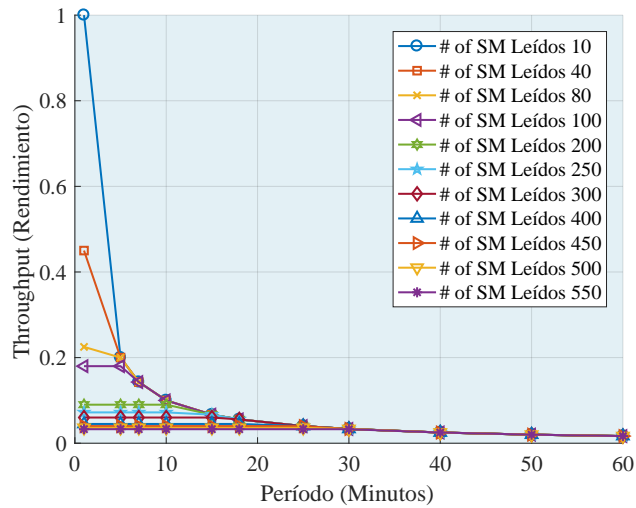


Figura 5.4: Rendimiento (Throughput) vs Tiempo - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ Fuente Autor

En la figura 5.5 se puede ver de manera similar a la figura 5.4, pero en este caso el rendimiento en relación con el número de SMs. En este caso la figura muestra un Th más alto con un pequeño número de SMs en un corto tiempo; pero, al incrementar el número de SMs se llega también a una saturación y el aumento del Th no se consigue.

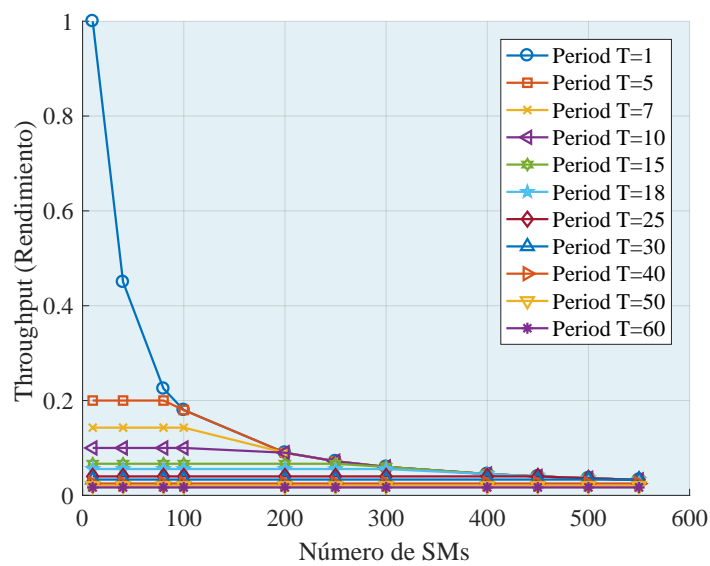


Figura 5.5: Período T para lectura de SMs - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ Fuente Autor

En la figura 5.6 se puede visualizar el comportamiento en la línea del tiempo, en la que se incrementa el número de SMs y se espera leer a los SMs y es cuando el Th disminuye; de esta manera con un número pequeño de SMs el Th es elevado.

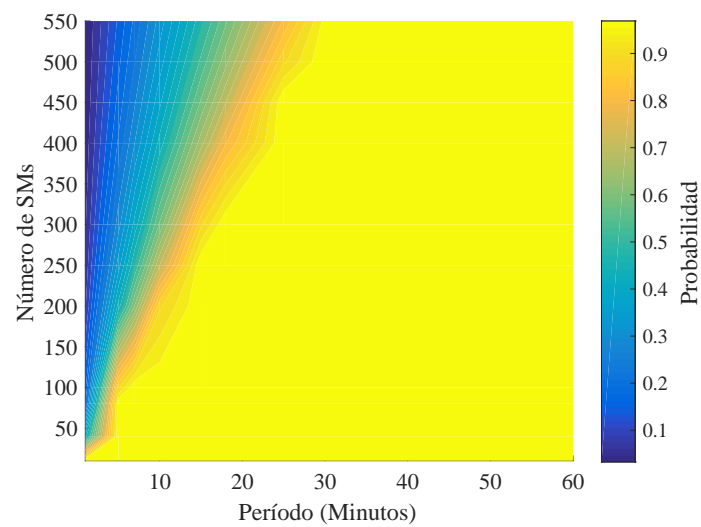


Figura 5.6: Relación del número de SMS, T período de tiempo y probabilidad de Transmisión - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ Fuente Autor

En la figura 5.7 el análisis sobre la línea del tiempo indica que mientras el número de SMS no es considerable y se dispone de un corto tiempo se tiene una probabilidad de medición inteligente muy baja, pero conforme la línea del tiempo avanza con el incremento del número de SMS la probabilidad de lectura se incrementa.

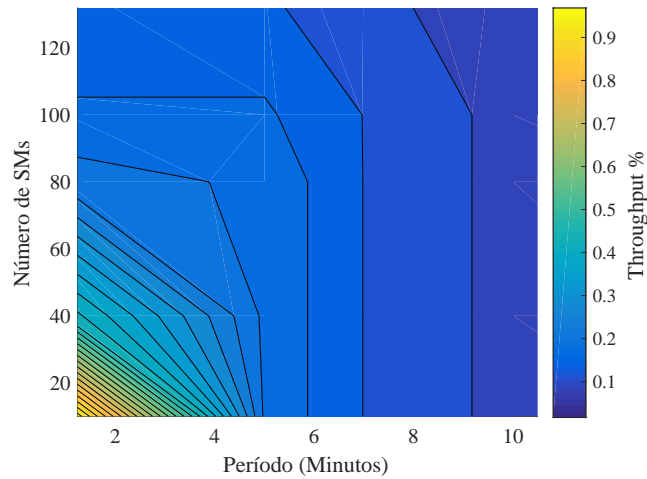


Figura 5.7: Relación del número de SMS y Probabilidad de lectura en el tiempo
 - $N_f=30$, $N_{ra}=10$, $N_r=8$ Fuente Autor

El algoritmo propuesto a través de la asignación por coincidencia o denominado *matching* de canales para el tráfico generado por SMS, genera una tendencia para un uso de canales e identifica el período en el que se está seguro de que los SMS puedan transmitir los datos de lectura de energía eléctrica usando un red celular. Es importante resaltar que los usuarios provenientes del operador primario pueden coexistir y alojar a nuevos usuarios que para el análisis serían los SMS pero considerados como usuarios secundarios.

Cuando se contempla la opción de formar un **MVNO** dedicado a tareas de AMI se convierte en una solución viable para reducir los costos por uso del

espectro primario; además, para formar un AMI no se requiere desplegar una infraestructura propia destinada a una tarea específica y se reducen los costos implícitos como los relacionados al mantenimiento, escalabilidad de la red o gestión por parte de las empresas de distribución eléctrica.

En consecuencia si se dispone de un C-MVNO adicionando la etapa cognitiva al clásico MVNO se minimizan los costes a través del uso oportunista del espectro que inicialmente requiere un leasing o arrendamiento. Es así que un MVNO también pueda ser utilizado por otra empresa de servicio celular dirigido a otro tipo de servicio; pero, se adiciona cierta complejidad por la detección de agujeros blancos que se requiere conocer para entregar a disposición de AMI. Cuando hay este tipo de incertidumbre para encontrar huecos blancos disponibles para AMI, resulta imprescindible garantizar un arrendamiento de cierta cantidad de canales para el MVNO.

5.2.2. Problema Despliegue Óptimo de Redes Inalámbricas Heterogéneas

La presente sección permite dar a conocer el proceso de evaluación del modelo denominado óptima planeación para despliegue de redes heterogéneas inalámbricas para AMI OPDWHN-AMI. El modelo se ha desarrollado en Matlab.

El modelo determinado en el capítulo 4 como del tipo combinatorio y conocido como del tipo NP-complete, incluye a diferentes poblaciones de SMs que requieren ser conectados con las empresas de distribución, en este caso se propone usar un elemento intermedio como concentrador denominado punto de agregación de datos universal UDAP, este concentrador puede albergar diferentes tecnologías inalámbricas; a estos elementos relacionados con tecnología se denominan recursos.

El modelo presenta un grafo con SMs en un subconjunto o conglomerado por cada UDAP activo.

Para el proceso de simulación heurístico se han tomado diferentes densidades de poblaciones de medidores inteligentes SMs determinado en $N=32, 64, 128, 256, 512$, dentro de un área de 1Km en el barrio Laureles de la ciudad de Medellín y ubicados de forma aleatoria, en función de que una población de SM no es uniforme en las zonas de emplazamiento ya sean urbanas, suburbanas o rurales. También se han considerado diferentes capacidades para cada UDAP $C=5, 10, 20, 40$ en términos del número de SM que puede aglutinar, el nú-

mero de estaciones base celular dentro del escenario EB=3. El modelo permite parametrizar la ubicación de los SM de acuerdo al sistema georeferenciado que posea la empresa de distribución eléctrica.

El posicionamiento de los elementos dentro del escenario real de planeación se muestra en la figura 5.8 donde se ilustra un mapa georeferenciado de un escenario de planeación para SMs con $N=256$, un conjunto factible de UDAPs $M=118$ y la ubicación de las estaciones base $K=3$, la capacidad ha sido configurada como $C=20$.

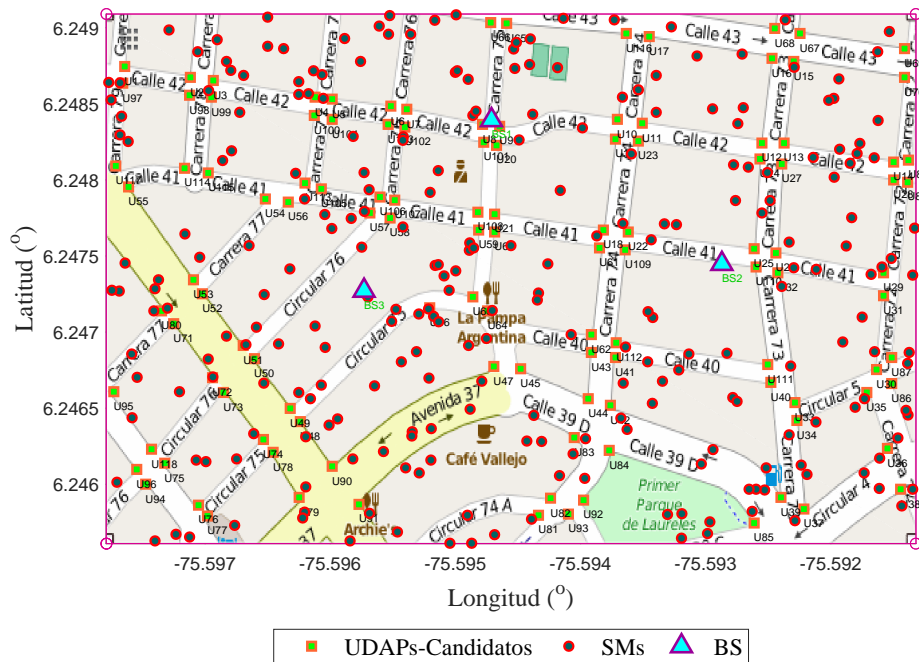


Figura 5.8: UDAP candidatos, SMs y estaciones base. Fuente Autor

El posicionamiento de las viviendas ha sido generada de manera aleatoria dentro un escenario georeferenciado e insertado sobre un archivo *.osm que se ha descargado de www.openstreetmap.org. De esta manera, el escenario contiene el posicionamiento en coordenadas de los SMs; UDAP y se interpretan en longitud y latitud; el cálculo de las distancias se ha realizado acorde con la fórmula de *Haversine*. Para determinar el comportamiento del modelo se han practicado diferentes iteraciones en cada población de SMs descritas.

En la figura 5.9 se puede encontrar el resultado preliminar del proceso de optimización con la inclusión de un algoritmo basado en PRIM pero modificado para incluir el número de saltos que se requiere para formar un red heterogénea y que posteriormente tendrá una solución mediante un proceso de donde se intenta cubrir a todos los SMs a través del algoritmo de Asociado a resolver el problema de Setcover denominado codicioso, eligiendo de esta manera a los UDAPs que permiten la interconexión de los SMs dispuestos para el despliegue. Es importante destacar que debido a la característica de multi-salto de las redes heterogéneas existirán SMs que no serán conectados a menos que la distancia máxima entre SMs y/o entre UDAPs sea permitida o cumplida en la restricción proveniente del tipo de tecnología empleada.

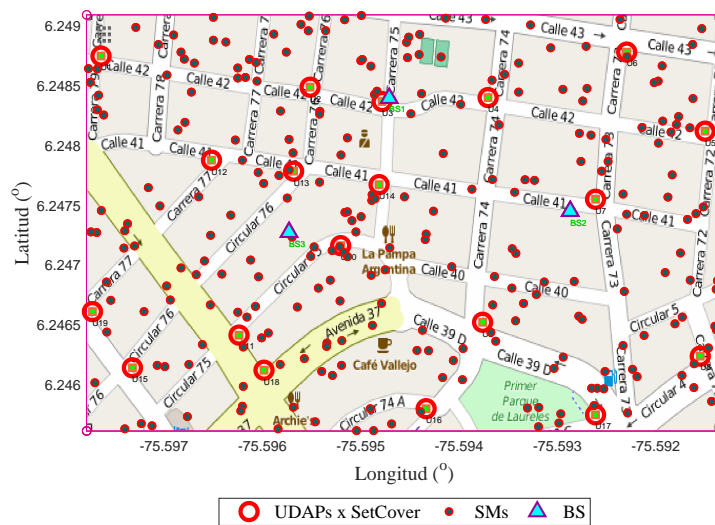


Figura 5.9: Preselección de UDAP usando PRIM modificado y SetCover. Fuente Autor

Posteriormente en la figura 5.10, es posible visualizar el comportamiento del grafo expuesto en un árbol de Steiner con un enrutamiento entre las estaciones base celular (EB), los concentradores (UDAP) y los medidores inteligentes (SMs), en este caso se puede advertir la capacidad de cada UDAP de $C = 20$.

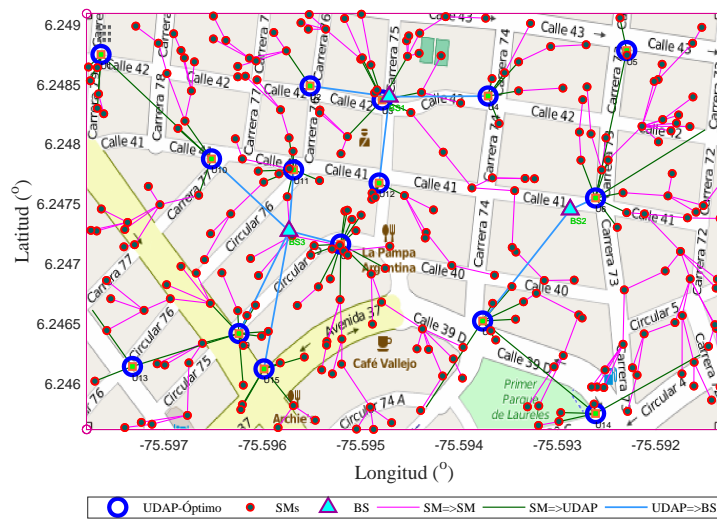


Figura 5.10: Óptimo número de UDAP - 100% Cobertura y Capacidad=20. Fuente Autor

El estado final de la simulación en la figura 5.11 se ha realizado a través de *convexhull* para mejorar la interpretación gráfica de los SMs que forman un conglomerado en cada UDAP activo, se ha mantenido el enrutamiento formado entre los SMs; UDAP y EB.

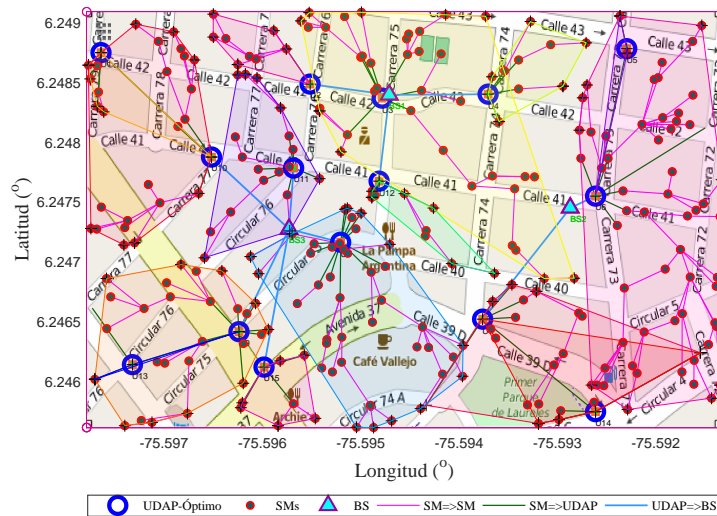


Figura 5.11: Conglomerados de SMs usando el mínimo número de UDAPs. Fuente Autor

Un análisis más general del OPDWHN-AMI respecto de rendimiento con diferentes opciones se describe a continuación. La figura 5.12 indica la carga de cada UDAP para todas las capacidades ensayadas y las diferentes densidades de población de SMs.

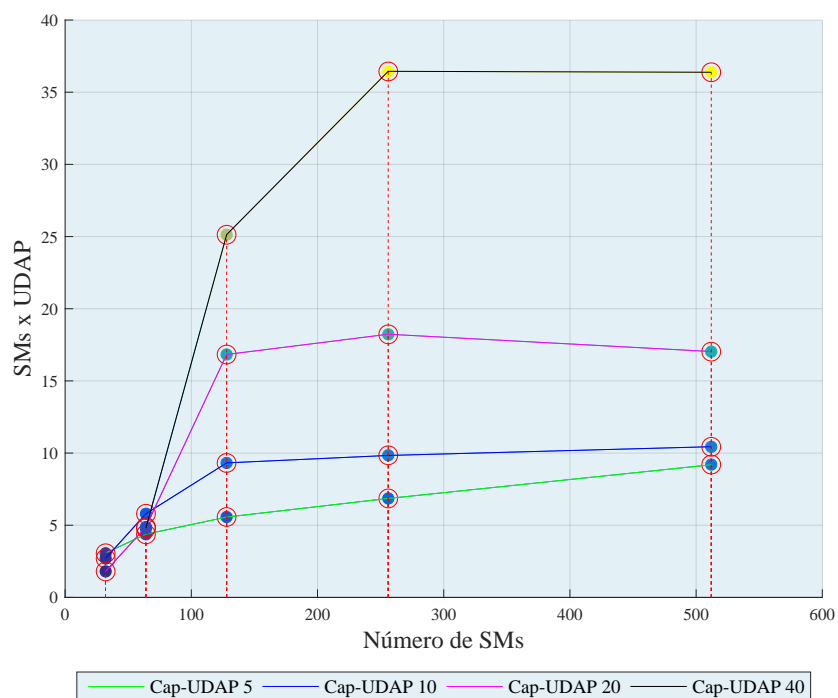


Figura 5.12: Promedio de cargabilidad de UDAPs. Fuente Autor

Cuando el número de SMs y la capacidad son bajas, la carga de cada UDAP es también baja. Así, cuando el número de SMs se incrementa y la capacidad es baja, la carga de cada UDAP apenas se incrementa. En otras palabras, cuando C es incrementado pero también el número de SMs se incrementa no hay un cambio sustancial en términos de la carga de los UDAPs debido a la saturación. De esta manera, independientemente de cuánto aumenta C, el modelo alcanza

una carga constante para cada UDAP desplegado en el mapa.

Además se ha analizado la cobertura de SM alcanzada por el modelo. En la figura 5.13 se puede observar el 100 por ciento de cobertura cuando la capacidad C es baja, en esta etapa es importa denotar que cuando el número SMs es lo suficientemente grande se proporciona una mejor conectividad por multi-salto o *multi-hop* para este caso se presenta cuando el número de SMs es igual a 256 ó 512.

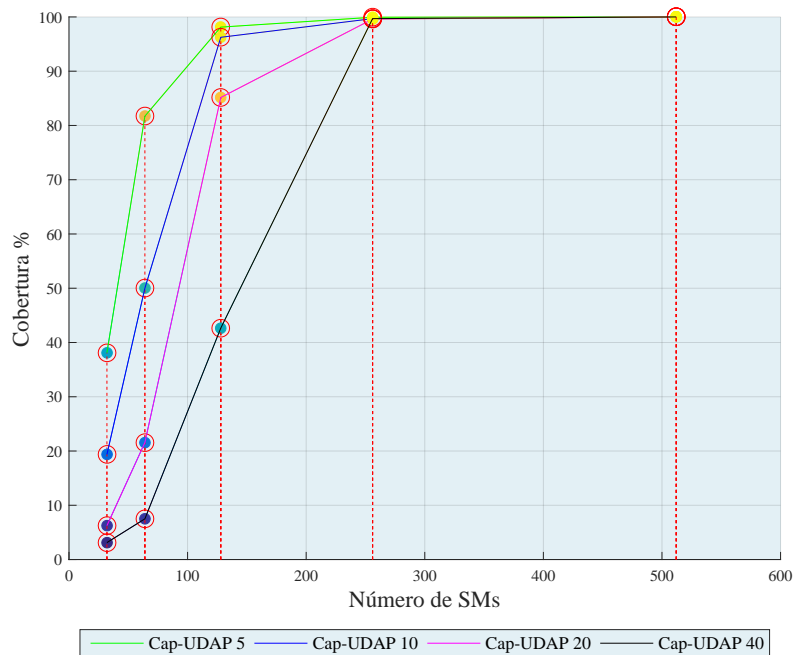


Figura 5.13: Porcentaje (%) de cobertura de SMs. Fuente Autor

También se observa que para poblaciones pequeñas y una alta capacidad

de UDAPs, no hay conectividad completa para los SMs hasta que el número de SMs es lo suficientemente grande como para permitir la conectividad por multi-salto.

El modelo heurístico encuentra el número de UDAPs preseleccionados basados en los algoritmos y **Greedy**, después de lo cual se obtiene el número óptimo de UDAPs el resultado se presenta en la figura 5.14. El número final de recursos que logró el modelo muestra una reducción en comparación con la preselección **Greedy** de 29 por ciento, 32 por ciento, 18 por ciento y 36 por ciento, respectivamente, para cada capacidad **UDAP**; por lo que, el costo final de los recursos para lograr cobertura total de la red AMI también puede ser reducido.

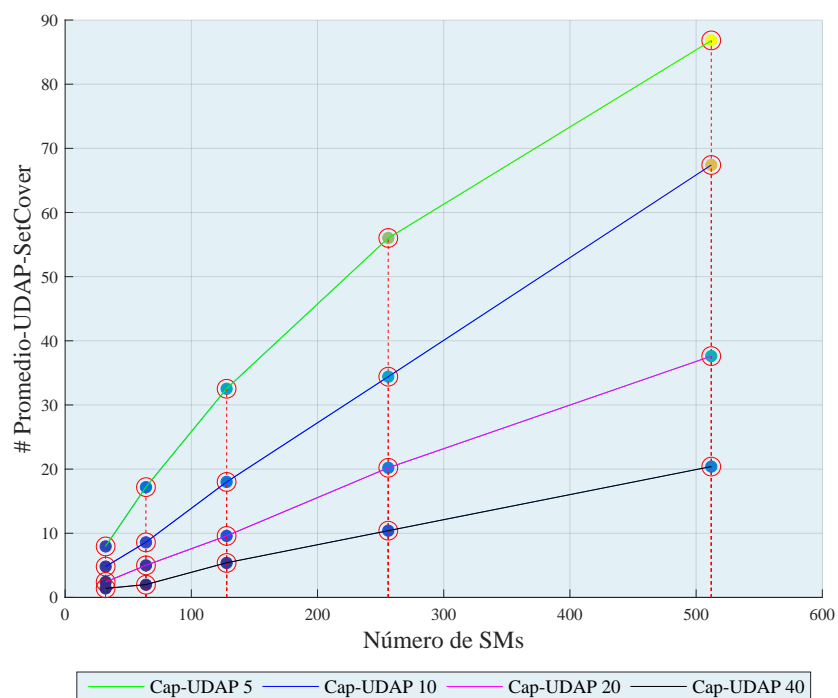


Figura 5.14: Pre-selección de UDAP basado en Setcover - Greedy. Fuente Autor

En la figura 5.15 el número óptimo de UDAP según se incremente la población de SMs, permitiendo reducir los costos por recursos empleados para conseguir la cobertura total de SMs con la red de comunicaciones propuesta para AMI.

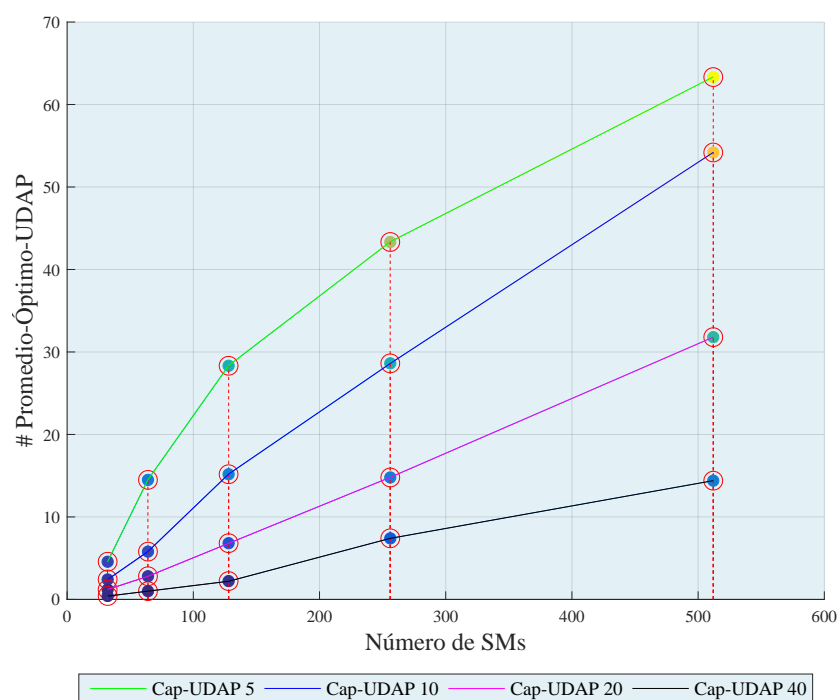


Figura 5.15: Óptimo número de UDAPs. Fuente Autor

Los resultados de este modelo evolucionado demuestran que combinando tecnologías inalámbricas y empleando puntos de agregación de datos con localizaciones optimizadas, la red es capaz de alcanzar una cobertura objetivo de medidores inteligentes con un costo reducido en términos de despliegue de recursos tecnológicos.

En esta etapa se ha propuesto a través del modelo de enrutamiento escalable para una red heterogénea inalámbrica que brinde el soporte de las comuni-

caciones del AMI en la red inteligente. El modelo define el número de recursos, clústers o conglomerados y enrutamiento entre los medidores inteligentes, los puntos de agregación de datos universales UDAP y las estaciones base celulares que finalmente se conectan a la oficina central de las empresas de distribución eléctrica. Se ha proporcionado comparaciones con otros modelos, en particular aquellos en los que se emplea una sola tecnología inalámbrica para conectar los medidores inteligentes.

Los resultados demuestran la optimización de los recursos de tecnología donde el modelo propuesto entrega la planificación óptima para el despliegue de redes heterogéneas inalámbricas en AMI OPDWHN-AMI con una mejor definición del número de recursos necesarios, la topología y los costos de varios escenarios posibles considerando diferentes densidades de población y distribución geográfica de los recursos.

Con el modelo OPDWHN-AMI se ha podido determinar aspectos tales como el número de UDAPs necesarios para garantizar un cierto porcentaje de cobertura de medidores inteligentes, la mejor agrupación para medidores inteligentes, el número de medidores inteligentes que pueden conectarse directamente a UDAPs u otros medidores inteligentes utilizando multi-salto; es decir se presenta un mapa de ruta completo iniciar un despliegue de los SMs hasta la oficina central de las empresas eléctricas.

El modelo de la sección 5.2.2 ha considerado la posibilidad de incluir un UDAP con dispositivo concentrador de SMs, sin embargo, el modelo no contempla la posibilidad de encontrar rutas congestionadas y buscar una mejor alternativa para llevar la información a través de multi-salto, esta situación advertida será mejorada con el modelo CMCF-AMI, además en este modelo un SM puede ser considerado como un UDAP facultad que mejora de forma considerable al modelo OPDWHN-AMI.

5.2.3. Problema de flujo de múltiples recursos

La motivación para realizar la presente heurística radica en que el hecho de que el modelo OPDWHN-AMI contempla la incorporación de concentradores UDAP, dispositivos que se ubicarán en sitios candidatos como las esquinas de las calles, pero entonces el modelo advierte la necesidad de lograr una escalabilidad no solo de la población inicial de SM sino la posibilidad de reconfiguración si el número de SM aumentó de forma repentina, que puede dar lugar a una posible falta de capacidad del UDAP, en término del número de SM máximo a albergar; por lo tanto, el nuevo modelo incorpora la facilidad de tener al

SM con un comportamiento de UDAP y permitirá que la red se auto reconfigure a partir de un análisis de congestión de la red por los flujos de cada enlace inalámbrico. En este punto entonces se advierte la innovación y aporte de la tesis de doctorado incluyendo un modelo que se auto configura y modifica según las necesidades de recursos o crecimiento de la población de SM

A continuación se presentan los resultados generados por el modelo CMCF-AMI, este modelo resuelve el problema de enrutamiento de una red inalámbrica heterogénea permitiendo identificar el camino que toma el flujo de información desde los medidores inteligentes hasta llegar a la estación base celular.

En su primera etapa se considera como requerimiento para un despliegue real la georeferenciación del escenario identificando en el mapa el sector a desplegar una WHN. Una vez identificado el escenario se considera el número de medidores inteligentes que una empresa de distribución eléctrica desea instalar.

En la figura 5.16 se puede observar el escenario considerando conglomerados con un número N de medidores inteligentes instalados $N = 64$. Este valor podrá cambiar en función de la necesidad de la empresa y del recurso humano disponible para instalar los medidores inteligentes. El escenario considera un despliegue radial con el objeto de aprovechar la cobertura de una estación base celular.

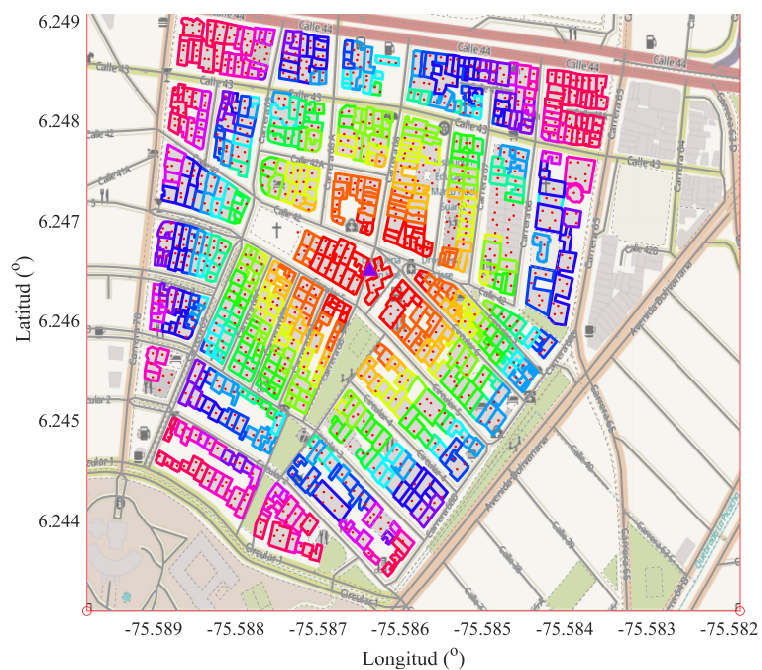


Figura 5.16: Escenario - Despliegue Radial de Medidores Inteligentes N=64.
Fuente Autor

El escenario considera una topología inicial respecto del radio de la estación base celular y del radio WiFi; por lo tanto, mientras mayor es el radio de la estación base celular y de WiFi, la topología de malla parcial se incrementa y las posibles rutas por donde viajarán los flujos de información también se incrementan. En la figura 5.17 se observa en color gris la topología previa para el despliegue considerando un radio de la estación base celular con 100 metros y el radio WiFi de 40 metros.

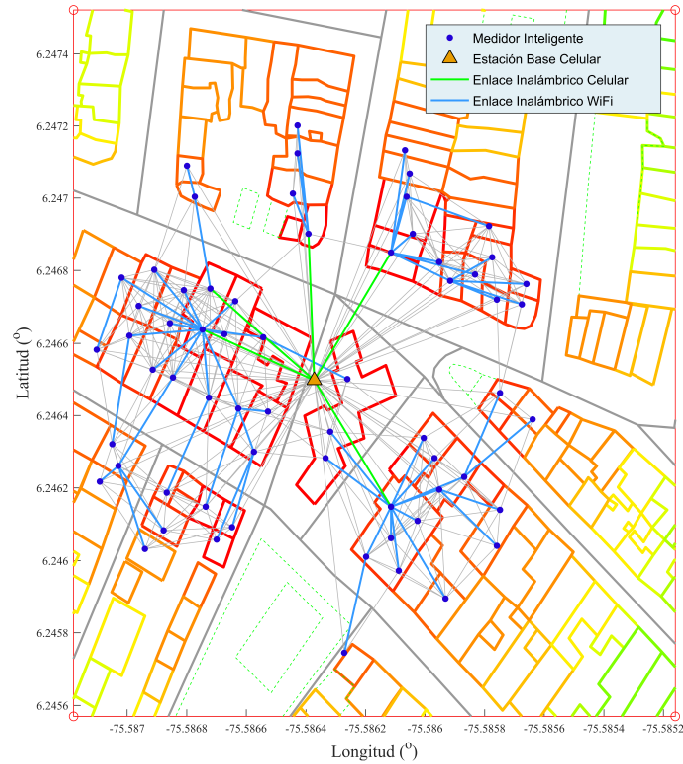


Figura 5.17: Escenario - Topología inicial radio Celular (100 metros radio WiFi-40 metros) Fuente Autor

En la figura 5.18 se puede apreciar el enrutamiento celular y el enrutamiento WiFi definido a partir de la topología factible para el flujo óptimo de información. Se visualizan los medidores inteligentes, la ubicación de la estación base celular con los enlaces celular en color verde y los enlaces WiFi en color azul.

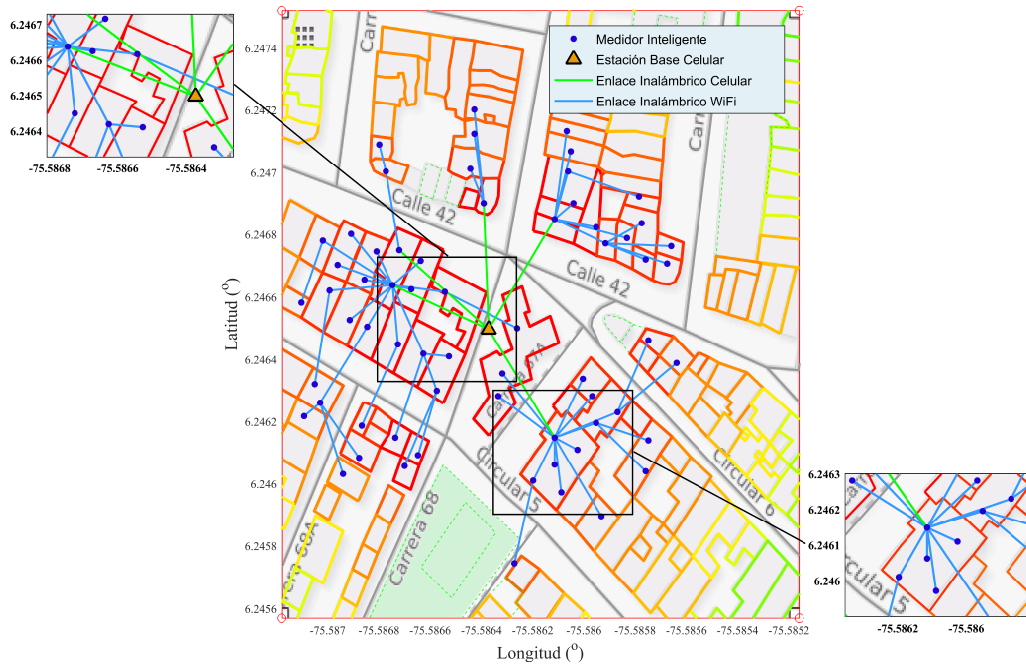


Figura 5.18: Escenario - Enrutamiento Celular(Verde) - WiFi(Azul) Fuente Autor

En la figura 5.19 se encuentra la representación numérica del uso del enlace, es decir se tiene que al uso como el número o cantidad de flujos que van a través del enlace, es importante recordar que un flujo pudo haberse dividido en uno o más enlaces, es decir el valor en tanto por ciento puede estar fragmentado con el que se optimiza el uso del enlace pero garantizando que la información llegue a su destino.



Figura 5.20: Escenario - Ocupación del Enlace. Fuente Autor

En la tabla 5.1 se aprecia el número de iteraciones que requirió el modelo para alcanzar la solución deseada en las diferentes poblaciones de SM ensayadas. El número de iteraciones de la primera etapa corresponde a la búsqueda por exploración que relaciona a la restricción de la distancia máxima permitida como radio de la estación base celular. El número de iteraciones de la primera etapa es el mismo, ya que este proceso lo hizo una sola vez para cada población y conforme escala la población el número de iteraciones de la segunda etapa varía pero se logra apreciar que no tiene un comportamiento exponencial, ya que posteriormente cuando más alta es la población de SM el número de iteraciones empieza a decrecer. Esto en particular se debe a la naturaleza del método de generación de columnas que a mayor población el método requiere menor número de iteraciones y su eficiencia mejora en relación a pequeñas

poblaciones.

Tabla 5.1: Escenario - Iteraciones

Escenario #	Población # SMs	Iteraciones		
		Etap 1	Etap 2	Total
1	32	56	179	235
2	64	56	208	264
3	96	56	329	385
4	128	56	169	225
5	160	56	133	189
6	192	56	62	118

En figura 5.21 se puede apreciar el número de iteraciones de cada etapa en este caso observador principal, problema primario y problema secundario, este último de menor acción en el contexto global de la heurística.

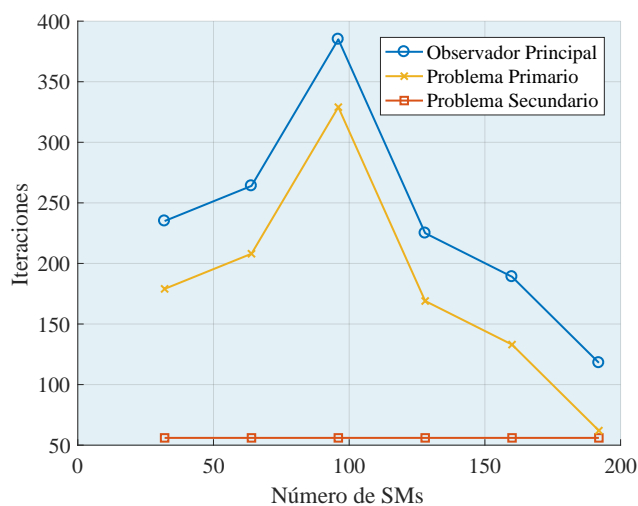


Figura 5.21: Escenario - Iteraciones de las etapas de la Heurística CMCF-AMI. Fuente Autor

En la tabla 5.2 se presenta los valores obtenidos de función objetivo para obtener los SM que han sido los requeridos para hacer uso de la tecnología celular; por lo tanto, son los nodos que mejor aportan a la solución que consigue

únicamente el número necesario de **SM** que permite minimizar los costos por recursos empleados.

Tabla 5.2: Escenario - Revised Simplex (Función Objetivo)

Escenario #	Población #Función Objetivo	Tamaño Vector		
		x	y	Base
1	32	534	316	316
2	64	999	712	316
3	96	2080	1148	316
4	128	2282	1574	316
5	160	3476	2002	316
6	192	3972	2494	316

Adicional a la función objetivo en la tabla 5.2 se presenta la variación del tamaño de x , y que son los resultados primal y dual obtenidos al resolver por el método simplex para la generación de columnas. De igual manera se observa a la *Base* con un valor constante debido que el número de **SM** candidatos no ha sido modificado con el crecimiento de cada población escalable de **SM**.

La eficiencia y rendimiento del modelo se presenta en la tabla 5.3, la misma indica la variación incremental del tiempo del CPU requerido para cada crecimiento poblacional de **SM**. Según lo explicado en el capítulo 4.3 el modelo formado por un observador principal encierra el tiempo global del modelo, mientras que el problema primario para la generación de columnas tiene un intervalo diferente; adicionalmente, el tiempo del problema secundario encargado de modificar la topología que entrega al problema primario tiene un tiempo constante debido a su incidencia mínima de tiempo en el total empleado para cada población de **SM**.

Tabla 5.3: Escenario - Escalabilidad y rendimiento.

Escenario #	Población # SMs	Intervalo de tiempo [s]		
		Obs. Principal	Prob. Primario	Prob Secundario
1	32	1.36e+03	33.52	0.68
2	64	1.62e+04	1.07e+03	0.68
3	96	2.97e+05	1.08e+04	0.68
4	128	3.33e+05	9.85e+03	0.68
5	160	5.87e+05	2.10e+04	0.68
6	192	5.27e+05	2.16e+04	0.68

En la figura 5.22 se puede observar el tiempo del problema primario y del problema secundario en relación con el observador principal que conlleva un tiempo mayor que dispone de la inteligencia del proceso heurístico.

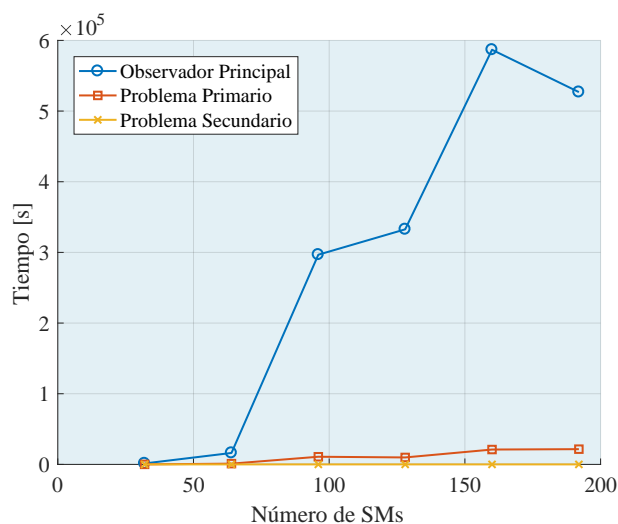


Figura 5.22: Escenario - Rendimiento de las etapas de la Heurística CMCF-AMI.
Fuente Autor

En la tabla 5.4 y 5.5, se presenta el resultado del comportamiento de las pérdidas en espacio libre tanto de los SM con tecnología WiFi como los SM con tecnología celular. Este indicador ayuda para relacionar con las características de antenas que suelen emplearse en cada frecuencia, entonces Free Space Path Loss (FSPL) se incrementa con el aumento de la frecuencia, se debe recordar que FSPL es proporcional al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, y también proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal del radio en este caso de la tecnología empleada en SM.

Tabla 5.4: Escenario - Path Loss Celular - Cobertura.

Escenario #	Población # SMs	Cobertura %	Parámetros FSL - Celular		
			850MHz	1700 MHz	1900 MHz
1	32	100	61.29	67.31	68.28
2	64	100	61.72	67.74	68.71
3	96	100	61.74	67.76	68.73
4	128	100	61.91	67.93	68.89
5	160	100	62.49	68.52	69.48
6	192	100	62.89	68.91	69.87

En la figura 5.23 se presenta la variación FSPL de los enlaces inalámbricos con tecnología celular que corresponden a los SM que finalmente quedaron conectados a la .

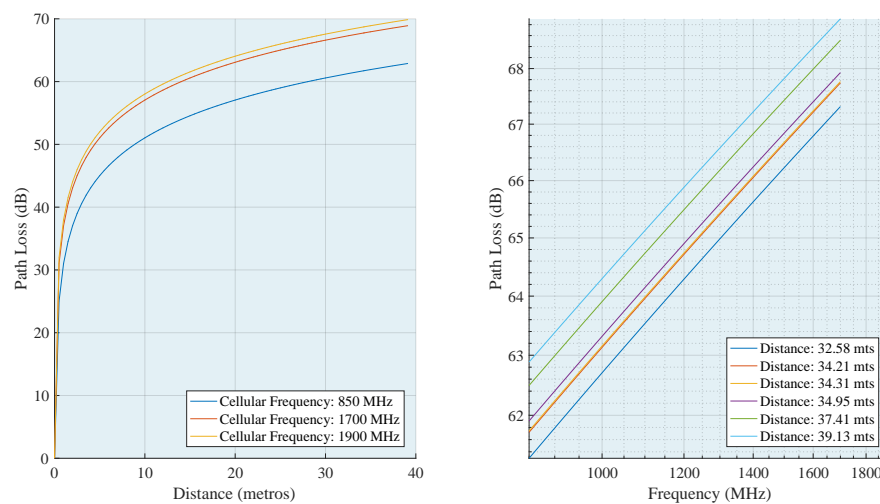


Figura 5.23: Escenario - FSL para enlaces inalámbricos con tecnología celular.
Fuente Autor

Tabla 5.5: Escenario - Path Loss WiFi - Cobertura.

Escenario #	Población # SMs	Cobertura %	Parámetros FSL - WiFi		
			2.4GHz	5.4 GHz	5.8GHz
1	32	100	67.6589	74.7026	75.3232
2	64	100	68.1190	75.1627	75.7834
3	96	100	68.3018	75.3455	75.9661
4	128	100	68.3588	75.4025	76.0231
5	160	100	68.9041	75.9477	76.5684
6	192	100	68.9114	75.9551	76.5758

En la figura 5.24 se presenta la variación de **FSPL** de los enlaces inalámbricos con tecnología **WiFi** que corresponden a los **SM** que finalmente quedaron conectados a la .

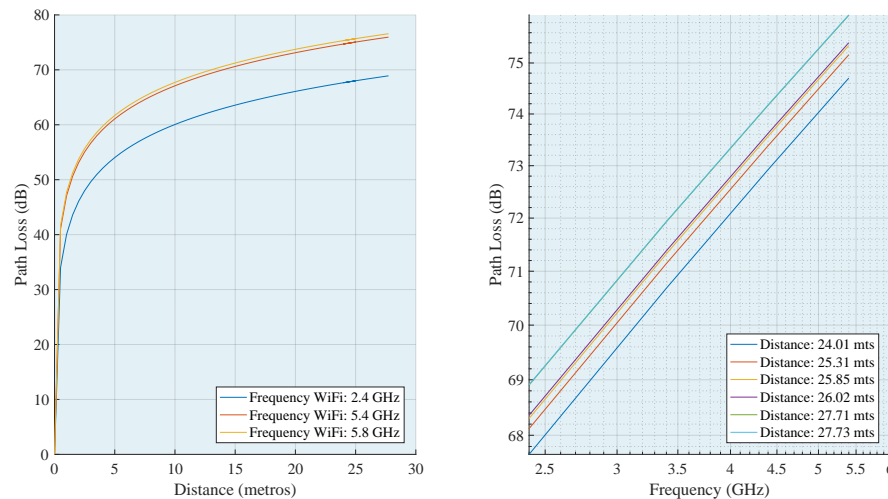


Figura 5.24: Escenario - FSL para enlaces inalámbricos con tecnología **WiFi**. Fuente Autor

La cargabilidad y el crecimiento poblacional de **SM** también tiene una estrecha relación con el consumo de energía, cada tecnología inalámbrica tiene un consumo ciertamente pequeño en relación con otros electrodomésticos, pero si se considera al número de clientes del sistema eléctrico que dispone de un

SM la situación cambia de forma sustancial, la tabla 5.6 permite interpretar este valor importante respecto del consumo de energía que emplea la medición inteligente de energía eléctrica. Entonces se tiene que el *uso* del enlace es igual a la solución primal del método simplex de cada enlace y la ocupación del enlace es igual al uso del enlace dividido para la capacidad del enlace multiplicado por 100 para obtener el valor en porcentaje, la tabla 5.6 presenta los valores promedio.

Tabla 5.6: Escenario - Consumo de Energía - Celular & WiFi.

Escenario #	Población # SMs	Celular [W]			WiFi [W]
		5W-LTE	4W-UMTS	2W-GPRS	1W
1	32	15	12	6	29
2	64	20	16	8	60
3	96	35	28	14	89
4	128	50	40	20	118
5	160	65	52	26	147
6	192	80	64	32	176

En la figura 5.25 se presenta el consumo de energía en watts que cada tecnología inalámbrica incurre al ser considerada en el despliegue, este valor es por el hardware de comunicaciones únicamente que se incorpora en cada SM.

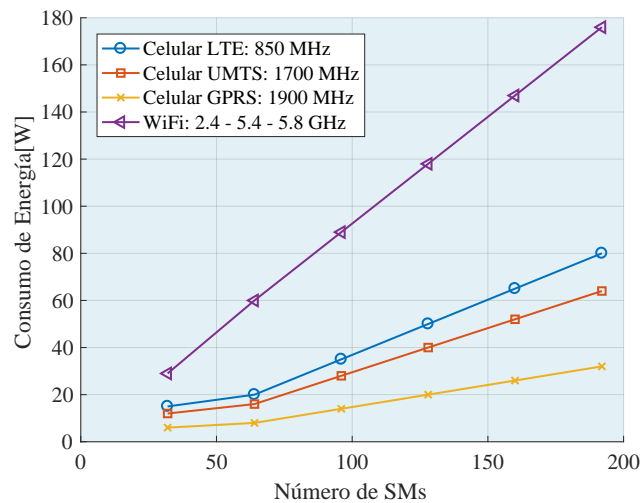


Figura 5.25: Escenario - Consumo de energía para la tecnología celular y WiFi.
Fuente Autor

La tabla 5.7, indica el crecimiento de cada tecnología. Se debe recordar que el costo de la tecnología celular tiene una diferencia de costo importante en relación a la tecnología WiFi aplicada en esta etapa. Se advierte que el modelo inicialmente puede considerar a todos los SM como candidatos a poseer tecnología celular; en tal sentido, esto representaría un costo elevado; es donde el modelo actúa y permite al incrementarse la población de SM también entrega un crecimiento paulatino del uso de tecnología WiFi y por consecuencia disminuye el número de SM con tecnología celular; de esta manera si minimizan los costos por el uso de los recursos empleados por una tecnología más costosa.

Tabla 5.7: Escenario - Cargabilidad - Costo (SM Celular & SM WiFi).

Escenario #	Población # SMs	Carga WiFi Promedio	Tecnología Inalámbrica	
			Costo: SM-Celular	Costo: SM-WiFi
1	32	3.08	3	29
2	64	3.21	4	60
3	96	3	7	89
4	128	3.02	10	118
5	160	2.92	13	147
6	192	2.84	16	176

En la figura 5.26 se presenta el número promedio de SM que se conectan a otro SM considerado como UDAP, de igual manera se observa el número de UDAP implementados por cada población de SM. Es importante recalcar que los SM en esta etapa del modelo CMCF-AMI pueden convertirse en UDAP debido a que el hardware de un SM puede incorporar una tarjeta celular o cualquier otra tecnología inalámbrica.

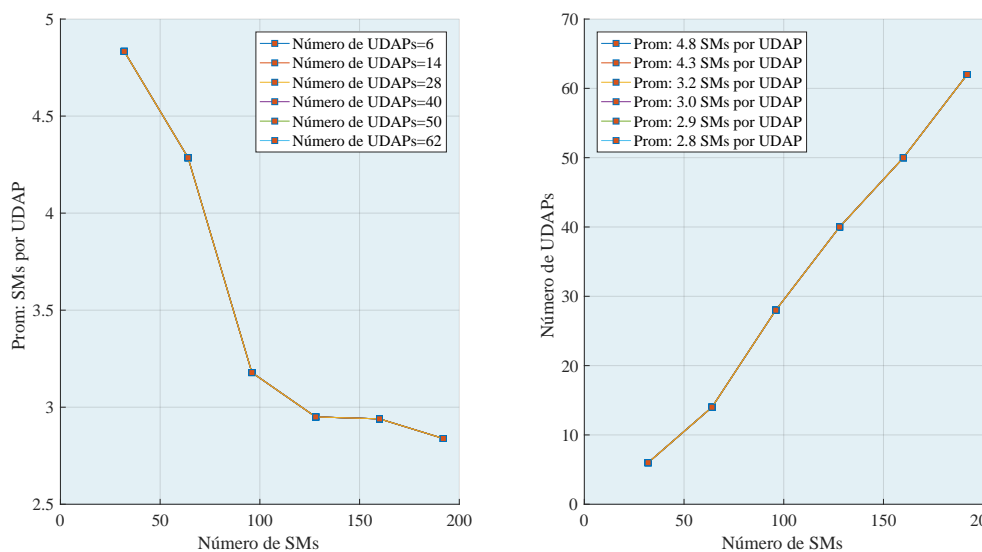


Figura 5.26: Escenario - Cargabilidad de SMs y Número de UDAPs. Fuente Autor

En la figura 5.27 se muestra el incremento masivo de la tecnología WiFi en relación a la reducción de tecnología celular y que permite obtener el 100% de cobertura para población de SM.

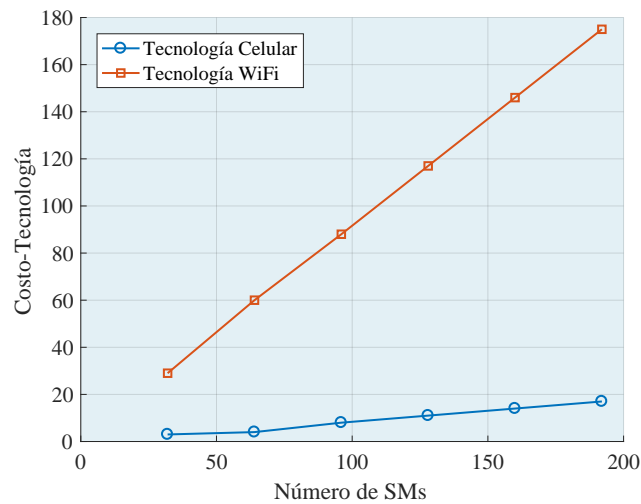


Figura 5.27: Escenario - Costo representativo en términos de optimización por tipo de tecnología inalámbrica. Fuente Autor

Finalmente la tabla 5.8 advierte la variación promedio del porcentaje% y cantidad del flujo del enlace tanto en uso como ocupación, se verifican los cambios entre cada población SM y el promedio de los flujos de los enlaces permiten identificar el proceso de optimización del modelo basado en generación de columnas para resolver un problema de capacidad de flujos de múltiples recurso inalámbricos celular y WiFi para medición inteligente de energía eléctrica.

Tabla 5.8: Escenario - Promedio Uso y Ocupación del Enlace.

Escenario	Población	Uso Enlace	Ocupación Enlace
#	# SMs	Prom	Prom %
1	32	1.97	10.7
2	64	2.5	14.1
3	96	2.56	14.7
4	128	2.93	16.8
5	160	3.22	18.9
6	192	3.46	20.3

A continuación en la figura 5.28 se presenta el cuadro resumen de enrutamiento WiFi y celular de los SM, la sección a) 32 SM; b) 64 SM; c) 96 SM; d) 128 SM; e) 160 SM; f) 192 SM

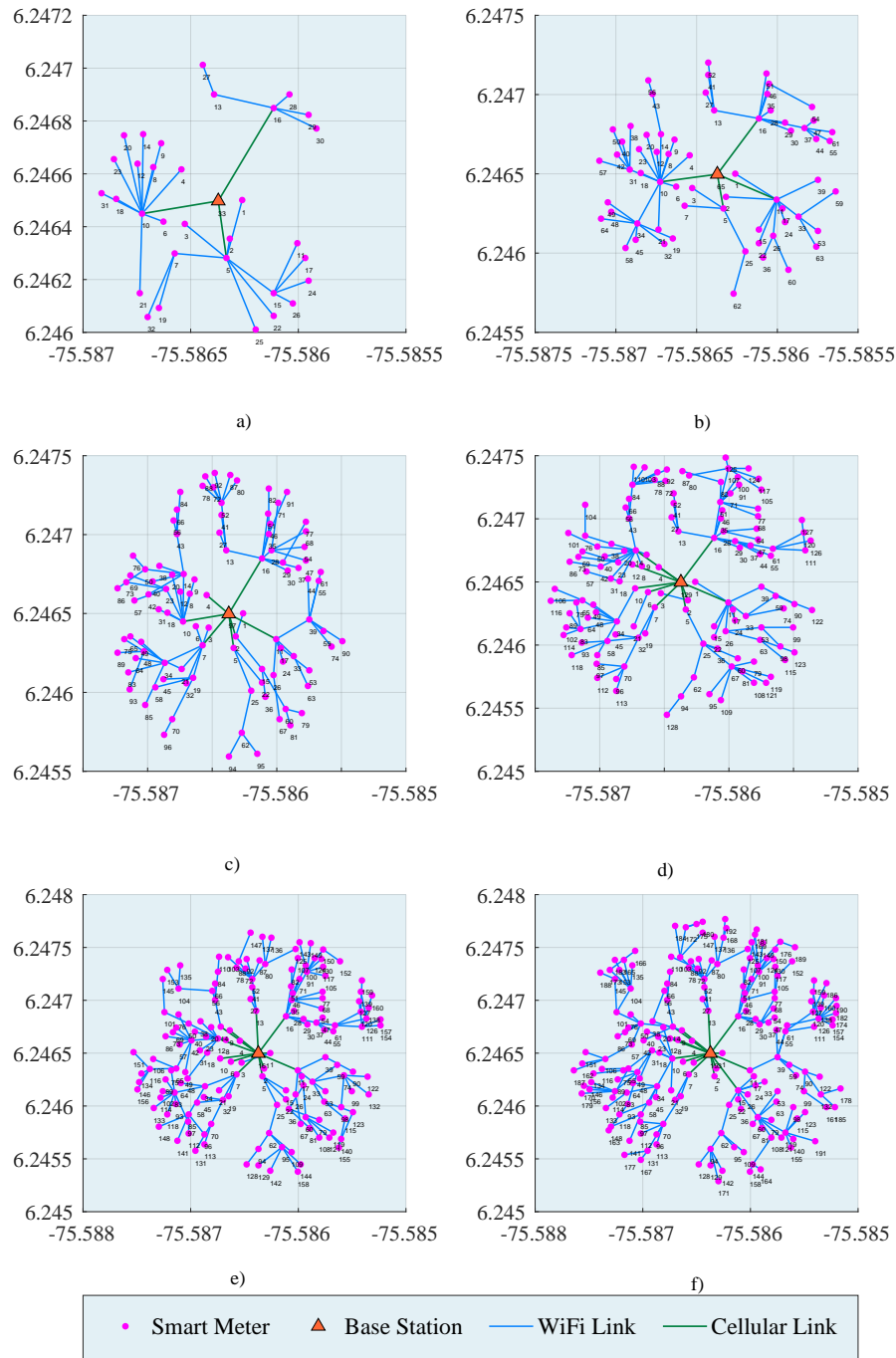


Figura 5.28: Escenario - Resumen de enrutamiento WiFi - Celular Fuente Autor

En la figura 5.29 se presenta el despliegue de redes inalámbricas heterogéneas con una población de $SM=192$. El escenario es georeferenciado y garantiza la cobertura del 100 %.

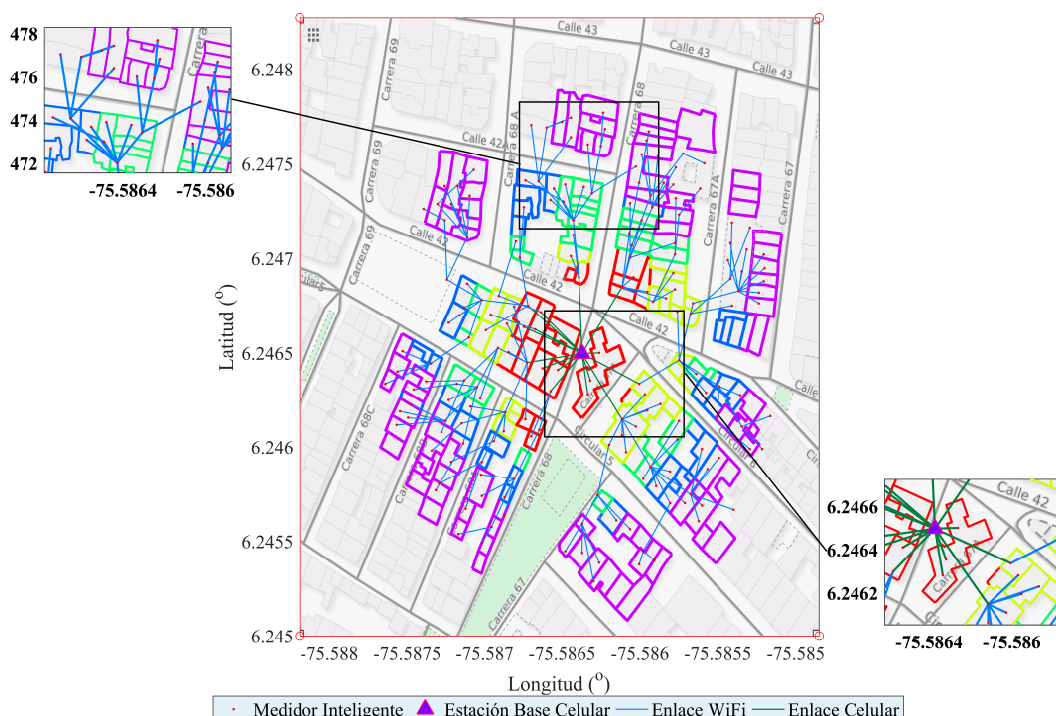


Figura 5.29: Escenario - Óptimo despliegue de Redes Inalámbricas Heterogéneas $SM=192$. Fuente Autor

La tabla 5.9 presenta la producción científica generada a partir del proceso Doctoral, ensayos preliminares respecto técnicas de agrupamiento de SM , resultados de los modelos previos en términos de asignación de recurso y resultados del método heurístico para despliegue óptimo de $UDAP$ usando una red multi-salto. El modelo heurísticos final se encuentra ya terminado y listo para envío a revista de cuartil Q1 – *Elsevier*

Tabla 5.9: Producción científica generada en el proceso Doctoral 2014-2017

Paper	Autor	Coautor	Autor	Coautor
Autor	Scopus/ISI-Cuartil	Scopus/ISI-Cuartil	Latindex	Latindex
Inga2017 [95]	Q1			
Inga2016 [139]	Q3			
Inga2016b [61]	Q3			
Inga2016c [193]	<i>Conferencia</i> IEEE			
Inga-Ortega2015 [154]	<i>Conferencia</i> IEEE			
Inga2015 [69]	<i>Conferencia</i> IEEE			
Inga2014 [194]	<i>Conferencia</i> IEEE			
Inga-ortega2017 [195]		<i>Conferencia</i> IEEE		
Inga2017b [28]		Q3		
PerezCruz2016 [196]		Q3		
Peralta2015a [192]		Q3		
Sevilla2015 [197]		Q3		
Ganan2017 [150]		Q3		
Inga2015ed [198]			<i>Revista</i>	
Inga2014w [49]			<i>Revista</i>	
Inga2016d [199]				<i>Revista</i>
Masache2015 [13]				<i>Revista</i>
Inga2018	Q1 <i>Elsevier – Edición</i>			
Peralta2018		Q1 IEEE – <i>Aceptado</i>		

A continuación se detallan las conclusiones y futuros trabajos que se desprende el presenta trabajo doctoral basado en las tres etapas analizadas como: asignación de recursos, enrutamiento de SM y UDAP y finalmente el modelo de enrutamiento considerando flujo de información bajo restricciones de ocupación del enlace inalámbrico.

Capítulo 6

Conclusiones

- La infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica según la literatura puede reutilizar una red de comunicaciones existente que le permite ahorro de costos por inversión y menos consumo de energía vs una red de comunicaciones nueva; para esto, se ha comprobado la opción de cohabitar usuarios de [AMI](#) con usuarios de telefonía celular, considerando para este particular solo usuarios de zonas donde existe conectividad de la red primaria celular y se ha demostrado que la propuesta es pertinente siempre que los tiempos para transmisión de los medidores inteligentes no sea un tiempo muy pequeño y es posible minimizar los costos de infraestructura con el uso de [MVNO](#); adicionalmente, para garantizar que no existan paquetes perdidos se debe alquilar una cierta cantidad de canales ya que la probabilidad de encontrar huecos blancos es reducida en zonas con densidad poblacional alta de usuarios celulares, esto puede ocasionar congestión y por lo tanto, no envío de paquetes de los usuarios de [AMI](#) debido a que el uso de canales es prioritario para los usuarios de telefonía celular. La masificación de usuarios primarios de telefonía celular introduce incertidumbre sobre la disponibilidad de recursos para [MVNO](#). Cuando un usuario principal emplea o libera un canal, cambia el conjunto de canales disponibles a un subconjunto de usuarios en un [C-MVNO](#).
- La planificación automática y escalable de una red heterogénea inalámbrica para [AMI](#) es sin duda alguna un proceso complejo, no convexo. El presente trabajo está compuesto de subproblemas internos como la asignación de canales denominado por varios autores como del tipo [NP-](#)

Complete). Para esta etapa según las referencias de varias metaheurísticas se ha desarrollado un algoritmo de asignación por emparejamiento de forma equitativa a través del algoritmo Húngaro que ha permitido conocer el comportamiento probabilístico de los canales de una red primaria celular y los canales secundarios y oportunistas que podría usarse en **AMI**.

- Varios autores han propuesto soluciones sencillas para tener un rápido despliegue de la red comunicaciones para **AMI** a través de una previa clusterización de los usuarios y emplear un concentrador en el centroide que finalmente logra la conectividad con una estación base celular que realizará el enlace de última milla con las empresas eléctricas. Por lo tanto, la propuesta de usar redes heterogéneas inalámbricas facilita dicho despliegue de forma oportuna debido a que el uso de las diferentes tecnologías inalámbricas tienen una capacidad de auto reconfiguración.
- Es importante destacar que se realizaron pruebas con diferentes técnicas de clusterización como k-means, kmedoids y mean shift, técnicas determinan un comportamiento no balanceado en relación al número de SMS que pudieran ser parte del conglomerado, de acuerdo a esto se realizó un algoritmos que permita obtener conglomerados mejor balanceados y así optimizar la cargabilidad de un **UDAP**, como innovación es la inclusión del número de saltos oportuno en un despliegue de redes heterogéneas inalámbricas.
- El modelo planteado en su etapa de enrutamiento incluye asignación de recursos, para lo cual se considera a los **SM** con cero movilidad que puede ser resuelto a través de una preselección de posiciones candidatas para desplegar un **UDAP** que normalmente se emplazaría en postes de alumbrado público, sobre un poste de alumbrado público, con los **UDAP** preseleccionado se resuelve el problema del y abarca el mayor número de **SM** para así obtener el mayor porcentaje de cobertura. Cuando el problema trivial inicial se ha resuelto se procede a generar un enrutamiento a través de una técnica heurística de exploración que se adapta a los algoritmos de **PRIM** en versión modificada y greedy, la heurística contempla costos y que exista como recurso la capacidad disponible para cada **UDAP** generando de esta manera un Tree.
- Cuando se planifica una red **WHN** se incorporan topologías de multi-

salto pero con un bajo tráfico con tramas de transmisión completas para lograr la eficiencia del enlace punto multi-punto. Por otro lado, si existe un requerimiento de un flujo de datos muy grande provenientes de **SMs**, no existe posibilidad para incluir nuevas rutas por multi-salto.

- Se ha encontrado que cuando un **SM** no dispone de conectividad de la tecnología secundaria en este caso **WiFi** no es posible realizar un multi-salto para llegar a la más cercana, situación similar a lo que ocurre en una zona rural, para resolver esta situación particular del problema se soluciona con un enlace celular que le permita llegar a una estación celular cercana o a un concentrador **UDAP** con tecnología celular que puede ser usado para zonas de baja penetración celular. Sin embargo la zona podría no tener enlace celular, para tal situación es necesario incorporar **UDAP** que contemplen un hardware **WiFi** y celular.
- Frutos de los resultados previos de enrutamiento del modelo 4.3.1, se encuentra un problema adicional debido a multi-salto mostrado por un multi-grafo de las diferentes topologías que podrían desprenderse al repartir el flujo de información, para esto se planteó un problema conocido como: capacitated multicommodity flow a través de un método heurístico conocido como generación de columnas. De esta manera, como se necesita analizar varias rutas debido a la división de los flujos en cada enlace existente se determinó la necesidad de generar un observador para el problema primario encargado de encontrar la topología inicial según las características de las tecnologías **WiFi** y la tecnología celular. En esta etapa se determina la congestión de los enlaces y se pasa a un problema secundario que visualiza un cambio en el enrutamiento inicial que pueda favorecer a la transmisión de información. Así se encuentra la mejor ruta de un conjunto de rutas inicialmente establecidas con la topología original, controlando la escalabilidad en el despliegue de **SMs** según se disponga de capacidad en los enlaces **WiFi** y celular.
- A partir de los resultados en torno al algoritmo de enrutamiento **CMCF-AMI**, se encuentra que al permitir la conectividad inicialmente de todos los nodos a la para identificar el nodo que más aporta a la descongestión de la red es un criterio oportuno, de allí en adelante cada nodo que se conecte de forma directa a la debe aportar significativamente a que los flujos de información no encuentren nodos congestionados y así evitar

que se pierda la información de medición inteligente de energía eléctrica. Cuando la zona de despliegue es una zona urbana la red tiene una mayor densidad de **SM**; entonces, hay caminos más cortos que deberían ayudar en la transmisión. El modelo entrega la disponibilidad en capacidad de los enlaces utilizados según se va incrementando el número de **SM**, entonces la innovación de la investigación ya está relacionada con la escalabilidad de la población de **SM** y la reconfiguración del enrutamiento cuando se presenten enlaces congestionados.

- Es importante definir el consumo de energía en el despliegue de la red inalámbrica, en este caso cada tecnología aporta con el consumo y de esta manera se entrega un patrón importante del impacto que genera una infraestructura de medición avanzada en torno al consumo de energía eléctrica por la tecnología empleada, el modelo al optimizar el uso de tecnología celular como única opción por la inclusión de tecnología **WiFi** reduce el consumo de energía, debido a la característica de tecnologías diferentes a la celular.
- El número de iteraciones del modelo **CMCF-AMI** va disminuyendo conforme se eleva el número de **SM** dando como característica que el método de generación de columnas mejora el rendimiento según se incrementa las poblaciones de manera sustancial.
- Las pérdidas en espacio libre presentadas en de los nodos **WiFi** como de los nodos con tecnología celular permiten determinar patrones requeridos para uso de antenas y sus posibles variaciones a causa de la distancia entre cada **SM** y que pueden existir a lo largo de un despliegue **AMI**. El parámetro de FSPL puede ser articulado como un peso adicional a la distancia-radio de cada tecnología, con este dato adicional el modelo podría generar un nuevo enrutamiento.
- El impacto de los modelos presentados en la investigación determinar un mapa de ruta para la empresas de distribución eléctrica, permitiendo determinar las zonas de despliegue, ubicar los puntos requeridos para un **UDAP** en los casos necesarios con el menor costo respecto del uso de los recursos.
- La investigación deja abiertas nuevas puertas y como futuros trabajos la opción de generalizar el modelo para ser resuelto con software solver

manteniendo ciertas variables estables debido al comportamiento conocido y propuesto por las tres etapas del problema doctoral.

- La propuesta también permite como opciones de trabajos futuros la inclusión de variables de retardos y latencia en la transmisión de paquetes de información proveniente de medición inteligente de energía eléctrica; sin embargo, se puede articular medición inteligente de agua, gas, consumo por carga de vehículos eléctricos y generación eléctrica por micro redes.

Capítulo 7

Glosario

AMI Término relacionado a la infraestructura de medición avanzada de electricidad.

AMR Término relacionado a la lectura de medición avanzada de electricidad.

AR Término relacionado a la acción que un recurso dispone como: capacidad, cobertura, canal y asignado a una tecnología.

ARCONEL Antes Conelec. Agencia de Regulación y Control de Electricidad - Ecuador.

BAN Red de área en edificios dentro del modelo de una red eléctrica inteligente y de la infraestructura de medición avanzada.

C-MVNO Adiciona el concepto de radio cognitiva para reducción de costos en el operador móvil de red virtual tradicional, transmitiendo por los huecos blancos no usados por el operador primario de red, es decir el que tiene la concesión.

CMCF-AMI Heurística creada par resolver el problema de capacidad por flujos de multirecursos en AMI.

Dijkstra Nombre del algoritmo empleado para encontrar el camino más corto de un punto a otro.

FSPL Patrón de pérdidas en espacio libre.

- GD** Etapa generadora de electricidad que se localiza cerca de la carga y su propósito es servir de usuarios del sistema eléctrico. Su característica principal es la interconexión con la etapa de distribución o sub transmisión del sistema eléctrico.
- GPRS** Servicio general de paquetes vía radio - celular.
- Greedy** Algoritmo codicioso usado para elegir la opción óptima en cada paso local para llegar a una solución general óptima.
- HAN** Red de comunicación aplicado a hogares dentro de una red eléctrica inteligente.
- Haversine** Fórmula para calcular la distancia entre dos puntos de la superficie terrestre a partir de latitud y longitud.
- IAN** Red de comunicación de aplicación industrial en el modelo de una red eléctrica inteligente.
- MAN** Red de área metropolitana encargada de unir a diferentes NAN. Esta red está dentro del modelo de una red eléctrica inteligente y de la infraestructura de medición avanzada.
- Matching** Concepto de coincidencia o emparejamiento de canales usado para asignación equitativa de canales inalámbricos.
- MDMS** Término relacionado a los Sistemas de Gestión de Datos Medidos encargados de administrar la información proveniente de la medición inteligente de energía eléctrica.
- MNO** Unidad de negocio que posee una concesión de espectro de frecuencia, es decir posee una infraestructura de red propia.
- MVNO** Unidad de negocio que no posee una concesión de espectro de frecuencia, es decir no posee una infraestructura de red propia, entonces para brindar servicio recurre a la cobertura de red de otra empresa a través de un convenio.
- NAN** Red de área vecindaria encargada de unir a HAN con WAN y MAN. Esta red está dentro del modelo de una red eléctrica inteligente y de la infraestructura de medición avanzada.

- NP-Complete** Problema combinatorial que se puede verificar rápidamente (en tiempo polinómico) pero no hay manera eficaz para localizar una solución única y óptima.
- OPDWHN-AMI** Heurística generada para lograr una óptima planificación para despliegue de redes inalámbricas heterogeneas.
- Openstreetmap** Sitio Web para descarga de mapas de ciudades en formato OSM.
- PRIM** Algoritmo de teoría de grafos para encontrar un mínimo árbol de expansión en un grafo conexo, no dirigido.
- Radio Cognitiva** Concepto para las comunicaciones inalámbricas en las que una red o una interfaz inalámbrica cambia sus parámetros de transmisión y recepción para evitar interferencias con usuarios con o sin licencia y comunicarse de manera eficiente.
- Revised Simplex** Nombre del algoritmo empleado como variante al método simplex realizado por George Dantzig que incorpora una matriz que representa las restricciones.
- SM** Conocido como Smart Meter es el dispositivo electrónico instalado en los diferentes tipos de usuarios del sistema eléctrico (residencial, comercial, industrial) para realizar trabajos de lectura automática, cortes y reconexiones, servicio prepago.
- Smart Grid** Red eléctrica inteligente, denominación al modelo de red de eficiencia y confiabilidad energética.
- UDAP** Punto de agregación de datos universal. Puede incorporar varias tecnologías de acceso, con varios radios de diferentes tipos de tecnología inalámbrica. En resumen es un concentrador de información de varios medidores inteligentes contemplando varias tecnologías de comunicación.
- WAN** Red de área amplia encargada de unir a diferentes MAN. Esta red está dentro del modelo de una red eléctrica inteligente.

WHN Red inalámbrica heterogénea. Es una red con dispositivos en diferentes tecnologías de acceso o protocolos de comunicación.

WiFi Nombre comercial de la popular tecnología inalámbrica basada en el estándar IEEE 802,11 y varias de sus variantes.

WSN Wireless Sensor Network, es una red inalámbrica que consiste en nodos espacialmente distribuidos que utilizan sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales de una manera cooperativa.

Bibliografía

- [1] A. Carvallo and J. Cooper, *The advanced smart grid edge power driving sustainability*. Boston: Artech House, 2011. [Online]. Available: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=387622http://www.amazon.com/The-Advanced-Smart-Grid-Sustainability/dp/1608071278/ref=sr_{ }1_{ }9?ie=UTF8&qid=1372188913&sr=8-9&keywords=smart+grid
- [2] J.-J. DeLisle, “IOT Wireless Technologies,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mwrf.com/systems/4-major-m2m-and-iot-challenges-you-need-know>
- [3] E. India, “Role of Smart Meters in Smart Grid,” 2017. [Online]. Available: <http://www.electricalindia.in/blog/post/id/14765/role-of-smart-meters-in-smart-grid>
- [4] E. Hossain, Z. Han, and H. V. Poor, *Smart grid communications and networking*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. [Online]. Available: http://www.amazon.com/Smart-Communications-Networking-Ekram-Hossain/dp/1107014131/ref=sr_{ }1_{ }1?ie=UTF8&qid=1372188345&sr=8-1&keywords=smart+grid+communications+and+networking
- [5] A. Peralta, E. Inga, and R. Hincapié, “FiWi Network Planning for Smart Metering Based on Multistage Stochastic Programming,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 13, no. 12, pp. 3838–3843, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7404917&newsearch=true&queryText=FiWiNetworkPlanningforSmartMeteringBasedonMultistageStochasticProgramming>

- [6] 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*, jun 2013, pp. 1–5. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6689711/6691801/06692710.pdf?tp=&arnumber=6692710&isnumber=6691801http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6692710
- [7] G. L. Ockwell, C. T. Officer, and A. C. Systems, "Beyond AMI in Tomorrow's Smart Grid," *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)*, no. Concapan Xxxv, 2015.
- [8] B. Adebisi, A. Treytl, A. Haidine, A. Portnoy, R. Shan, D. Lund, H. Pille, and B. Honary, "IP-centric high rate narrowband PLC for smart grid applications," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 12, pp. 46–54, dec 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/35/6093994/06094005.pdf?tp=&arnumber=6094005&isnumber=6093994http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6094005>
- [9] S. M. Kaplan and TheCapitol.Net (Firm), *Smart grid: modernizing electric power transmission and distribution; energy independence, storage and security; energy independence and security act of 2007 (EISA); improving electrical grid efficiency, communication, reliability, and resiliency; integra*. Alexandria, VA: TheCapitol.Net, 2009. [Online]. Available: http://www.amazon.com/Smart-Grid-Transmission-Distribution-Independence/dp/1587331624/ref=sr_1_41?ie=UTF8&qid=1372188698&sr=8-41&keywords=smart+metering
- [10] Flick, Tony, *Securing the smart grid next generation power grid security*. Amsterdam; Boston: Syngress, 2011. [Online]. Available: http://www.amazon.com/Securing-Smart-Grid-Generation-Security/dp/1597495700/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1383927592&sr=8-1&keywords=securing+the+smart+grid
- [11] P.-Y. Chen, S.-M. Cheng, and K.-C. Chen, "Smart attacks in smart grid communication networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 8, pp. 24–29, aug 2012. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/35/6257514/06257523.pdf?tp=&arnumber=6257523&isnumber=6257514http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6257523

- [12] P. LI, S. GUO, and Z. CHENG, “Joint Optimization of Electricity and Communication Cost for Meter Data Collection in Smart Grid,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 1, no. 2, 2014.
- [13] P. Masache, E. Inga, and R. Hincapié, “Optimal Planning for Cellular Networks for Smart Metering Infrastructure in Rural and Remote Areas * Óptima Planeación de Redes Celulares para la Infraestructura de Medición Inteligente en Zonas Rurales y Remotas,” *Revista INGE-CUC*, vol. 11, no. 2, pp. 49–58, 2015.
- [14] E. Yaacoub and A. Abu-Dayya, “Automatic meter reading in the smart grid using contention based random access over the free cellular spectrum,” *Computer Networks - Elsevier*, vol. 59, pp. 171–183, feb 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128613003691>
- [15] L. Bedogni, A. Trotta, M. Di Felice, and L. Bononi, “Machine-to-Machine Communication over TV White Spaces for Smart Metering Applications,” in *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2013 22nd International Conference on*, jul 2013, pp. 1–7. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6603810/6614072/06614149.pdf?tp={&}arnumber=6614149{&}isnumber=6614072http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs_{_}all.jsp?arnumber=6614149
- [16] L. Bedogni, A. Achtzehn, M. Petrova, and M. Petri, “Smart Meters with TV Gray Spaces Connectivity : A Feasibility Study for Two Reference Network Topologies,” *IEEE SECON 2014*, 2014.
- [17] B. Lichtensteiger, B. Bjelajac, C. Muller, and C. Wietfeld, “RF Mesh Systems for Smart Metering: System Architecture and Performance,” *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pp. 379–384, 2010.
- [18] F. Malandra, “Analytical performance analysis of a large-scale RF-mesh smart meter communication system,” *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, p. 6, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7131840/>
- [19] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, “Smart meters in smart grid: An overview,” *IEEE Green Technologies Conference*, pp. 57–64, 2013.

- [20] 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)*, oct 2013, pp. 324–329. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6678912/6687920/06687978.pdf?tp={&}arnumber=6687978{&}isnumber=6687920http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6687978>
- [21] 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 Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–7, apr 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6554419>
- [22] D. Hincapie and S. Cespedes, “Evaluation of mesh-under and route-over routing strategies in AMI systems,” in *Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian*, may 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/6225461/6233638/06233670.pdf?tp={&}arnumber=6233670{&}isnumber=6233638http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6233670{&}queryText=Evaluation+of+Mesh-under+and+Route-over+Routing+Strategies+in+AMI+systems>
- [23] C. Warmer, K. Kok, S. Karnouskos, A. Weidlich, D. Nestle, P. Selzam, J. Ringelstein, A. Dimeas, and S. Drenkard, “Web services for integration of smart houses in the smart grid,” *Grid-Interop-The road to an interoperable grid, Denver, Colorado, USA*, pp. 17–19, 2009. [Online]. Available: <http://smarthouse-smartgrid.eu/fileadmin/templateSHSG/docs/publications/GridInterop.pdf>
- [24] S. M. P. M. Google, “Smart Metering Projects Map,” 2016. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=zReklSu043lk.kZ{ }YiimMzyXc{&}hl=en{ }US>
- [25] S. D. M. Google, “Smart Demand Map,” 2016. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=zVliTRgvfoUE.kPKAvumZH7Zo{&}hl=en{ }US>

- [26] E. Mauricio and I. Ortega, "Redes de Comunicación en Smart Grid," *Ingenius*, pp. 36–55, 2012.
- [27] C. Wietfeld, H. Georg, S. Gr, C. Lewandowski, and J. Schmutzler, "Wireless M2M Communication Networks for Smart Grid Applications," pp. 275–281, 2011. [Online]. Available: <http://www.vde-verlag.de/proceedings-en/563343110.html>
- [28] J. Inga, E. Inga, R. Hincapi, and G. Cristina, "Optimal Planning for Deployment of FiWi Networks based on Hybrid Heuristic Process," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 2017.
- [29] P. Yi, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Building Automation Networks for Smart Grids," *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2011, pp. 1–12, 2011. [Online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijdmb/2011/926363/>
- [30] C. W. Gellings, *The smart grid: enabling energy efficiency and demand response*. Lilburn, GA: Fairmont Press : Taylor & Francis distribution, 2009. [Online]. Available: http://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss?url=search-alias=aps&field-keywords=smart+grid&rh=i:aps,k:smart+grid
- [31] J. Jiang and Y. Qian, "Distributed Communication Architecture for Smart Grid Applications," *IEEE Communications Magazine*, no. December, pp. 60–67, 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7786112/>
- [32] A. Molderink, V. Bakker, M. G. C. Bosman, J. L. Hurink, and G. J. M. Smit, "Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in Smart Grids," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1–7, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5281849>
- [33] Z. Fadlullah, M. Fouda, N. Kato, A. Takeuchi, N. Iwasaki, and Y. Nozaki, "Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 60–65, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/35/5741133/05741147.pdf?tp=&arnumber=5741147&isnumber=5741133http://ieeexplore.ieee>

[org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5741147{&}searchWithin=home+area+network{&}subscribed=true{&}queryText=smart+metering](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13511610.2012.660327)

- [34] E. Tranos and D. Gertner, “Smart networked cities?” *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, vol. 25, no. 2, pp. 175–190, 2012. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13511610.2012.660327>
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13511610.2012.660327>
- [35] Eu Commission Tf For Smart Grids Expert Group, “Functionalities of smart grids and smart meters,” *Group*, vol. 23, no. December, pp. 1–69, 2010. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/smartgrids/doc/expert_group1.pdf
- [36] T. Sauter and M. Lobashov, “End-to-End Communication Architecture for Smart Grids,” pp. 1218–1228, 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5559470
- [37] V. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. Hancke, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, nov 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/9424/6056501/06011696.pdf?tp={&}arnumber=6011696{&}isnumber=6056501>
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6011696
- [38] M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, and T. D. Hämäläinen, “Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications,” *ACM*, pp. 48–57, 2006. [Online]. Available: <http://cs.berkeley.edu/~culler/AIIT/papers/performanceanalysis/Zigbeep48-kohvakka.pdf>
- [39] T. Basso, S. Member, J. Hambrick, and D. Deblasio, “Update and Review of IEEE P2030 Smart Grid Interoperability and IEEE 1547 Interconnection Standards,” *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1–7, 2012.
- [40] S. Celaschi, G. Mauri, R. Lazzari, and E. Micolano, “Tecnologie abilitanti la diffusione dei veicoli elettrici stradali plug-in: sistemi di accumulo, ricarica e telecomunicazioni,” *Rapporto ERSE*, vol.

- 10000839, 2010. [Online]. Available: http://www.ricercadisistema.it:8080/site/binaries/content/assets/rse-sola-lettura/progresso/2009/Impatto_sul_sistema_elettrico_della_potenziale_diffusione_dei_veicoli_elettrici/bfd3206a-a1a5-4463-ac95-2608325ad654_rapporto.pdf
- [41] J. G. Cupp and M. E. Beehler, "Implementing smart grid communications," *Burns & McDonnell Marketing Communications*, 2008. [Online]. Available: <http://www.burnsmcd.com/Resource/Article/5445/PdfFile/article-smartgrid-part2-084.pdf>
- [42] A. Dieb Martins and E. C. Gurjao, "Processing of smart meters data based on random projections," *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–4, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6554421>
- [43] P. Corral, B. Coronado, A. De Castro Lima, and O. Ludwig, "Design of Automatic Meter Reading based on Zigbee," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 10, no. 1, pp. 1150–1155, 2012. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/9907/6142447/06142452.pdf?tp={&}arnumber=6142452{&}isnumber=6142447{&}5Cnhttp://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6142452{&}searchWithin{&}253Dtransactions{&}2526matchBoolean{&}253Dtrue{&}2526query>
- [44] H. Lamin and I. M. De Toledo Camargo, "Smart grids deployment in Brazil: A study from the perspective of a regulatory impact analysis," *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT LA 2013*, 2013.
- [45] M. Ortiz-rangel, L. Rueda-vasquez, and J. Petit, "Towards a Smart City : Design of a Domestic Smart Grid," *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, pp. 863–868, 2015.
- [46] R. H. L. Rodríguez and G. R. H. Céspedes, "Challenges of advanced metering infrastructure implementation in Colombia," *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America SGT LA 2011 - Conference Proceedings*, pp. 1–7, 2011.

- [47] R. Dias, J. C. Scaramutti, C. D. Arrojo, and H. A. Nastta, "Considerations on the role of smart meters in the incorporation of renewable energy sources through microgrids," *Proceedings of the 2014 IEEE Central America and Panama Convention, CONCAPAN 2014*, no. Concapan Xxxiv, 2014.
- [48] F. A. A. S. J. A. F. Magnago, "A Low Cost Smart Metering Infrastructure with Centralized Demand Response Management," *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, pp. 520–524, 2015.
- [49] C. Sousa, G. Souza, L. Fernando, N. Passos, R. Z. Homma, I. Moraes, R. C. Carrano, and R. C. Andrade, "Link Quality Estimation for AMI," *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, pp. 646–649, 2015.
- [50] A. Nusairat, "Joint Throughput Optimization for Wireless Mesh Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 7, pp. 895–909, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4674357>
- [51] R. Castellanos and P. Millan, "Design of a wireless communications network for advanced metering infrastructure in a utility in Colombia," in *Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian*, may 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/6225461/6233638/06233649.pdf?tp={&}arnumber=6233649{&}isnumber=6233638http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6233649{&}queryText=Design+of+A+Wireless+Communications+Network+for+Advanced+Metering+Infra-+structure+in+A+Utility+in+Colombia>
- [52] B. Karimi and V. Namboodiri, "On the Capacity of a Wireless Backhaul for the Distribution Level of the Smart Grid," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 521–532, jun 2014. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/4267003/6819870/06544262.pdf?tp={&}arnumber=6544262{&}isnumber=6819870http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6544262{&}matchBoolean{&}253Dtrue{&}2526queryText{&}253DCapacity+Analysis+of+a>

- [53] D. F. Ramírez, S. Céspedes, C. Becerra, and C. Lazo, "Performance evaluation of future AMI applications in Smart Grid Neighborhood Area Networks," *2015 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2015 - Conference Proceedings*, 2015.
- [54] D.-M. Han and J.-H. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5606276{&}isnumber=5606236http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5606276{&}searchWithin=wireless+network{&}searchWithin=smart+metering{&}subscribed=true{&}queryText=Telecommunications+Management+Network>
- [55] H. S. Cho, S. Member, T. Yamazaki, and M. Hahn, "Determining Location of Appliances from Multi-hop Tree Structures of Power Strip Type Smart Meters," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 4, pp. 2314–2322, 2009.
- [56] A. Vojdani, "Smart Integration," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 6, pp. 71–79, 2008. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=4626381{&}isnumber=4626369http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=4626381{&}searchWithin=home+area+network{&}subscribed=true{&}queryText=smart+metering>
- [57] E. Yaacoub and A. Abu-Dayya, "Automatic meter reading in the smart grid using contention based random access over the free cellular spectrum," *Computer Networks*. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128613003691http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S1389128613003691http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S1389128613003691/pdf?md5=2d5fd873b521812c3453378eb0bbcf15{&}pid=1-s2.0-S1389128613003691-main.pdf>
- [58] A. Clark and C. J. Pavlovski, "Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks," *Computer*, vol. II, 2010. [Online]. Available: <http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010{ }pp1243-1248.pdf>

- [59] G. Meer, Conelec, Cenace, Celec, “Programa Redes Inteligentes Ecuador - Mapa de Ruta,” p. 65, 2013.
- [60] E. Inga and J. Rodriguez, “Estretegias de Negocio Para Medición Inteligente Acoplando Energías Renovables,” *Primer Congreso Internacional y Expo Científica*, vol. 1, no. Investigación Sostenible: Energías Renovables y Eficiencia Energética, pp. 281–291, 2013.
- [61] J. Inga, E. Inga, and R. Hincapié, “Evaluación de la Infraestructura de Medición y la Respuesta de la Demanda,” *Revista Técnica “energía”*, no. 12, pp. 262–269, 2016.
- [62] M. Kezunovic, “Verifying Interoperability and Application Performance of PMUs and PMU-enabled IEDs at the Device and System Level,” *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1–3, 2011.
- [63] S. T. Mak, L. F. Ieee, and E. International, “Synchronizing SCADA and Smart Meters Operation For Advanced Smart Distribution Grid Applications,” *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, pp. 1–7, 2012.
- [64] Y. Deng, H. Lin, A. G. Phadke, S. Shukla, J. S. Thorp, and L. Mili, “Communication Network Modeling and Simulation for Wide Area Measurement Applications,” *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2011.
- [65] M. Arian, M. Ameli, V. Soleimani, and S. Ghazalizadeh, “Intelligent migration from smart metering to smart grid,” pp. 547–552, 2011.
- [66] B. Wojszczyk, “Deployment of Advanced Smart Grid Solutions – Global Examples & Lessons Learned,” *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, p. 27607, 2011.
- [67] A. Vargas and M. Samper, “Real-Time Monitoring and Economic Dispatch of Smart Distribution Grids: High Performance Algorithms for DMS Applications,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 866 –877, jun 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5165411/6204228/06184358.pdf?tp={&}arnumber=6184358{&}isnumber=6204228http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6184358>

- [68] S. Abdollahy, S. Member, O. Lavrova, A. Mammoli, S. Willard, and B. Arellano, "PNM Smart Grid Demonstration Project from Modeling to Demonstration," *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1–6, 2011.
- [69] E. Inga, R. Hincapie, C. Suarez, and G. Arevalo, "Shortest path for optimal routing on Advanced Metering Infrastructure using cellular networks," in *Communications and Computing (COLCOM), 2015 IEEE Colombian Conference on*, Popayan, 2015, pp. 1 – 6.
- [70] A. Fawaz, R. Berthier, and W. Sanders, "Cost modeling of response actions for automated response and recovery in AMI," in *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, nov 2012, pp. 348–353. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6479749/6485945/06486008.pdf?tp=&arnumber=6486008&isnumber=6485945http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6486008>
- [71] J. Zhou, R. Q. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6143933http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1105&context=computerelectronicfacpub>
- [72] 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*, may 2014, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6893068/6900900/06901098.pdf?tp=&arnumber=6901098&isnumber=6900900http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6901098>
- [73] F. Aalamifar, G. N. Shirazi, M. Noori, and L. Lampe, "Cost-efficient data aggregation point placement for advanced metering infrastructure," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, nov 2014, pp. 344–349. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7007670/http://ieeexplore.ieee.org/document/7007670/?part=1>

- [74] Z. Wan, G. Wang, Y. Yang, and S. Shi, "SKM: Scalable Key Management for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 7055–7066, dec 2014. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/41/6898054/06834788.pdf?tp={&}arnumber=6834788{&}isnumber=6898054http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6834788{&}queryText=SKM:+Scalable+Key+Management+for+Advanced+Meter>
- [75] S. Andreev, M. Gerasimenko, O. Galinina, Y. Koucheryavy, N. Himayat, S.-P. Yeh, and S. Talwar, "Intelligent access network selection in converged multi-radio heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 86–96, 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7000976>
- [76] N. Sahasrabudhe and J. Kuri, "Greedy scheduling in multihop wireless networks," in *2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, 2008, pp. 1–3. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4911415/4937757/04937786.pdf?tp={&}arnumber=4937786{&}isnumber=4937757http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=4937786{&}queryText=greedy+heuristic+in+cellular+network>
- [77] A. Capone, M. Cesana, D. D. Donno, and I. Filippini, "Deploying multiple interconnected gateways in heterogeneous wireless sensor networks: An optimization approach," *Computer Communications - Elsevier*, vol. 33, no. 10, pp. 1151–1161, jun 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366410000423>
- [78] S. C. Borst, A. Buvanewari, L. M. Drabeck, M. J. Flanagan, J. M. Graybeal, G. K. Hampel, M. Haner, W. M. MacDonald, P. a. Polakos, G. Rittenhouse, I. Saniee, A. Weiss, and P. a. Whiting, "Dynamic optimization in future cellular networks," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 99–119, aug 2005. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/bltj.20096>
- [79] C. Muller, H. Georg, M. Putzke, and C. Wietfeld, "Performance analysis of radio propagation models for Smart Grid applications," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, oct 2011, pp. 96–101. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/6093618/6102296/>

- 06102400.pdf?tp={&}arnumber=6102400{&}isnumber=6102296http://
bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6102400
- [80] Z. Fu, O. Landsiedel, M. Almgren, and M. Papatriantafilou, “Managing your trees: Insights from a metropolitan-scale low-power wireless network,” in *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, apr 2014, pp. 664–669. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6841218/6849127/06849310.pdf?tp={&}arnumber=6849310{&}isnumber=6849127http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6849310>
- [81] L. S. de Assis, P. M. Franca, and F. L. Usberti, “A redistricting problem applied to meter reading in power distribution networks,” *Computers & Operations Research - Elsevier*, vol. 41, pp. 65–75, jan 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813002086>
- [82] S. Park, N. Crespi, S. Oh, and S.-H. Kim, “Overlay Multicast Protocol with Proxy Districts for Dynamic Wireless Sensor Networks,” in *Network Computing and Applications (NCA), 2013 12th IEEE International Symposium on*, aug 2013, pp. 187–194. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6621247/6623622/06623662.pdf?tp={&}arnumber=6623662{&}isnumber=6623622http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6623662>
- [83] 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)*, nov 2012, pp. 109–115. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6467822/6468287/06468302.pdf?tp={&}arnumber=6468302{&}isnumber=6468287http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6468302>
- [84] H. Gharavi and C. Xu, “Distributed Application of the Traffic Scheduling Technique for Smart Grid Advanced Metering Applications Using Multi-Gate Mesh Networks,” in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, dec 2011, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/6132211/6133457/06133702.pdf?tp={&}arnumber=6133702{&}isnumber=6133457http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=6133702>

- [85] 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*, jan 2014, pp. 426–431. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6858322/6866537/06866605.pdf?tp={&}arnumber=6866605{&}isnumber=6866537http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs_{_}all.jsp?arnumber=6866605
- [86] 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*, jun 2014, pp. 3682–3687. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx7/6878057/6883277/06883894.pdf?tp={&}arnumber=6883894{&}isnumber=6883277http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs_{_}all.jsp?arnumber=6883894
- [87] R. Yu, Y. Zhang, S. Gjessing, C. Yuen, S. Xie, and M. Guizani, "Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid," *IEEE Network*, vol. 25, no. 5, pp. 6–14, oct 2011. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/65/6033025/06033030.pdf?tp={&}arnumber=6033030{&}isnumber=6033025http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_{_}all.jsp?arnumber=6033030
- [88] Y. Ding, K. Pongaliur, and L. Xiao, "Channel allocation and routing in hybrid multichannel multiradio wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 206–218, 2013.
- [89] K. Nagothu, S. Member, B. Kelley, S. Member, and M. Jamshidi, "Persistent Net-AMI for Microgrid Infrastructure Using Cognitive Radio on Cloud Data Centers," *Systems Journal, IEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 4–15, 2012.
- [90] S. Zhao, Q. Zhu, and H. Zhu, "Demand responsive pricing competition of two MVNOs in dynamic spectrum access," in *Communication Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on*, nov 2010, pp. 958–961. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5680737/5688496/05688565.pdf?tp={&}arnumber=5688565{&}isnumber=5688496http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5688565{&}queryText=cognitive+mobile+virtual+network+operator>

- [91] X. Sheng, J. Tang, C. Gao, W. Zhang, and C. Wang, "Leveraging load migration and basestaion consolidation for green communications in virtualized Cognitive Radio Networks," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, apr 2013, pp. 1267–1275. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6556116/6566708/06566919.pdf?tp={&}arnumber=6566919{&}isnumber=6566708http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6566919{&}searchWithin=planning{&}queryText=mobile+virtual+network+operator>
- [92] E. Bou-Harb, C. Fachkha, M. Pourzandi, M. Debbabi, and C. Assi, "Communication security for smart grid distribution networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 1, pp. 42–49, jan 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/35/6400427/06400437.pdf?tp={&}arnumber=6400437{&}isnumber=6400427http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6400437{&}queryText=Communication+security+for+smart+grid+distribution+networks>
- [93] L. Duan, J. Huang, and B. Shou, "Cognitive Mobile Virtual Network Operator: Investment and Pricing with Supply Uncertainty," in *IEEE INFOCOM 2010*, mar 2010, pp. 1–9. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5461675/5461899/05462146.pdf?tp={&}arnumber=5462146{&}isnumber=5461899http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5462146{&}queryText=cognitive+mobile+virtual+network+operator>
- [94] S. Li and J. Huang, "Dynamic Profit Maximization of Cognitive Mobile Virtual Network Operator," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 3, pp. 526–540, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/7755/4358975/06409849.pdf?tp={&}arnumber=6409849{&}isnumber=4358975http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6409849{&}searchWithin=scheduling{&}queryText=mobile+virtual+network+operator>
- [95] E. Inga, S. Céspedes, R. Hincapié, and C. Cárdenas, "Scalable Route Map for Advanced Metering Infrastructure Based on Optimal Routing of Wireless Heterogeneous Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. April, pp. 26–33, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7909154/>

- [96] L. Mastroeni and M. Naldi, "Spectrum reservation options for Mobile Virtual Network Operators," in *Next Generation Internet (NGI), 2010 6th EURO-NF Conference on - IEEE*, jun 2010, pp. 1–8. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5512517/5534454/05534477.pdf?tp={&}arnumber=5534477{&}isnumber=5534454http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5534477{&}queryText=Mobile+virtual+network+operator>
- [97] P. Li, S. Guo, S. Member, and Z. Cheng, "Joint Optimization of Electricity and Communication Cost for Meter Data Collection in Smart Grid," *Emerging Topics in Computing, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 2, pp. 297–306, 2013.
- [98] R. Hincapie, J. Tang, G. Xue, and R. Bustamante, "QoS Routing in Wireless Mesh Networks with Cognitive Radios," in *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, 2008, pp. 1–5. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4697774/4697775/04698708.pdf?tp={&}arnumber=4698708{&}isnumber=4697775http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=4698708>
- [99] I. E. Reid and H. A. Stevens, *Smart meters and the smart grid: privacy and cybersecurity considerations*. New York: Nova Science Publishers, 2012. [Online]. Available: <http://www.amazon.com/Smart-Meters-Grid-Cybersecurity-Considerations/dp/1620816202/ref=sr{ }1{ }11?ie=UTF8{&}qid=1390341300{&}sr=8-11{&}keywords=smart+meters+and+the+smart+grid>
- [100] H. Li, R. Mao, L. Lai, and R. C. Qiu, "Compressed Meter Reading for Delay-Sensitive and Secure Load Report in Smart Grid," *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 114–119, oct 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5622027>
- [101] T. Harrold, L. Wang, M. Beach, G. Salami, A. Yarmohammad, and O. Holland, "Spectrum sharing and cognitive radio," in *Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09. International Conference on*, oct 2009, pp. 1–8. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5340227/5345316/05345335.pdf?tp={&}arnumber=5345335{&}isnumber=5345316http://ieeexplore.>

ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5345335{&}queryText=cognitive+mobile+virtual+network+operator

- [102] I. Koutsopoulos and L. Tassiulas, "Control and Optimization Meet the Smart Power Grid - Scheduling of Power Demands for Optimal Energy Management," *Energy*, p. 9, 2010. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1008.3614>
- [103] P.-c. Lin, "Uplink Scheduling for Multi-Channel Multi-User Cognitive Radio Cellular Networks in Fading Channels," *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2012 15th International Symposium on*, pp. 559–563, 2012.
- [104] E. Yaacoub and Z. Dawy, "Centralized and distributed LTE uplink scheduling in a distributed base station scenario," *2009 International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications*, pp. 11–15, jul 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5227938>
- [105] A. Chiumento, S. Pollin, C. Desset, L. Van der Perre, and R. Lauwereins, "Analysis of power efficiency of schedulers in LTE," *2012 19th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, pp. 1–4, nov 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6399407>
- [106] A.-A. Mahmood and E. 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. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5504893/5506094/05506556.pdf?tp={&}arnumber=5506556{&}isnumber=5506094http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=5506556{&}queryText=Algorithm+to+obtain+the+minimum+cost+in+the+growth+of+wireless+networks>
- [107] Q. Li and R. Negi, "Greedy Maximal Scheduling in Wireless Networks," in *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, 2010, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1007.4840http://ieeexplore.ieee.org/document/5683487/>

- [108] 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*, 2015, pp. 1–6.
- [109] S. Nowak, M. Nowak, and K. Grochla, "Properties of advanced metering infrastructure networks' topologies," *IEEE/IFIP NOMS 2014 - IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Management in a Software Defined World*, 2014.
- [110] R. C. Das, P. P. Purohit, T. Alam, and M. Chowdhury, "Location based ATM locator system using OpenStreetMap," *SKIMA 2014 - 8th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications*, 2015.
- [111] T. Hayakawa, Y. Imi, and T. Ito, "Analysis of Quality of Data in OpenStreet-Map," *2012 IEEE 14th International Conference on Commerce and Enterprise Computing*, pp. 131–134, 2012.
- [112] Z. Dai, B. Wang, Z. Li, and A. Yin, "VDSPT: A sensor-actor coordination protocol for wireless sensor and actor network based on Voronoi diagram and shortest path tree," *Proceedings - 1st International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, CNMT 2009*, pp. 1–4, 2009.
- [113] R. H. Khan and J. Y. Khan, "A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network," *Computer Networks*, vol. 57, no. 3, pp. 825–845, feb 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612003751><http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S1389128612003751><http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S1389128612003751/pd>
- [114] S. Garlapati, R. M. Vaghefi, M. R. Buehrer, J. H. Reed, and V. Tech, "Performance Evaluation of Hybrid Spread Spectrum Based Advanced Smart Metering Infrastructure Network with Multi-User Detection Techniques in Jamming Channel," *Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2013 IEEE Topical Conference on*, pp. 154–156, 2013.

- [115] J. Fan, Q. Wu, and J. F. Hao, "Optimal deployment of wireless mesh sensor networks based on Delaunay triangulations," *ICINA 2010 - 2010 International Conference on Information, Networking and Automation, Proceedings*, vol. 1, pp. 370–374, 2010.
- [116] S. Bandyopadhyay and E. Coyle, "An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks," *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications.*, vol. 00, no. C, pp. 1713–1723, 2003. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=1209194
- [117] C. Qiu and H. Shen, "A Delaunay-based Location-free Mechanism for Full Coverage in Wireless Sensor Networks," *Computer Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 828–839, 2014.
- [118] P. P. Jayaraman, A. Zaslavsky, and J. Delsing, "Coverage area computation on the run for efficient sensor data collection," *Proceedings of New Technologies, Mobility and Security Conference and Workshops, NTMS 2008*, pp. 1–5, 2008.
- [119] H. Niska, "Extracting controllable heating loads from aggregated smart meter data using clustering and predictive modelling," *Proceedings of the 2013 IEEE 8th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing: Sensing the Future, ISSNIP 2013*, vol. 1, pp. 368–373, 2013.
- [120] M. E. Haque, M. M. Rahman, A. Rahman, and K. M. Imtiaz-Ud-Dinz, "Centroidal voronoi tessellation based energy efficient clustering protocol for heterogeneous wireless sensor and robot networks," *2014 17th International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2014*, pp. 452–457, 2003.
- [121] X. Pan, X. Zhang, H. Yu, and C. Zhang, "Study on routing protocol for WSNs based on the improved prim algorithm," *2009 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2009*, pp. 1–4, 2009.
- [122] A. E. F. Clementi, M. D. Ianni, A. Monti, G. Rossi, and R. Silvestri, "Experimental Analysis of Practically Efficient Algorithms for Bounded-Hop Accumulation in Ad-Hoc Wireless Networks," *Proceedings of the*

- 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), workshop 12*, vol. 13, no. c, 2005. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1420181>
- [123] L. B.-t. L. Ban-teng, C. Y.-r. C. You-rong, Z. K. Z. Kai, and J. H. J. Hua, "The Research of Wireless Sensor Networks Optimization Algorithm Based on the Energy Control," *Information Processing (ISIP), 2010 Third International Symposium on*, pp. 0–2, 2010.
- [124] G. Rolim, D. Passos, I. Moraes, and C. Albuquerque, "Modelling the Data Aggregator Positioning Problem in Smart Grids," *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*, pp. 632–639, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7363131>
- [125] C. Ma, W. Liang, M. Zheng, and H. Sharif, "A Connectivity-Aware Approximation Algorithm for Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. c, pp. 1–1, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7158992>
- [126] X. Huang, S. Wang, and C. Wang, "Aggregation Points Planning for Smart Grid Communications: Wired and Wireless Cases," *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, 2015.
- [127] S. Wang and X. Huang, "Aggregation Points Planning for Software-Defined Network Based Smart Grid Communications," *IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–9, 2016.
- [128] M. Fampa and K. M. Anstreicher, "An improved algorithm for computing Steiner minimal trees in Euclidean n -space," *Discrete Optimization*, vol. 5, no. 2, pp. 530–540, may 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572528607000473>
- [129] F. Wang, D. Wang, and J. Liu, "Traffic-aware relay node deployment: Maximizing lifetime for data collection wireless sensor networks," *IEEE*

Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 22, no. 8, pp. 1415–1423, 2011.

- [130] H. Guo, Y. Qian, K. Lu, and N. Moayeri, “Backbone Construction for Heterogeneous Wireless,” *2009 IEEE International Conference on Communications*, pp. 1 – 5, 2009.
- [131] S. Lee and M. Lee, “QRMSC : Efficient QoS-Aware Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks using Minimum Steiner Tree on the Convex Hull,” *The International Conference on Information Networking 2013 (ICOIN)*, pp. 36–41, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6496348&queryText=QRMSC:EfficientQoS-AwareRelayNodePlacementinWirelessSensorNetworksusingMinimumSteinerTree>true>
- [132] Y. Pei and M. W. Mutka, “Joint bandwidth-aware relay placement and routing in heterogeneous wireless networks,” *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Systems - ICPADS*, pp. 420–427, 2011.
- [133] A. Trotta, M. Di Felice, L. Bedogni, and L. Bononi, “Re-establishing network connectivity in post-disaster scenarios through mobile cognitive radio networks,” *12th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, MED-HOC-NET 2013*, pp. 18–25, 2013.
- [134] A. Zaballos, A. Vallejo, and J. Selga, “Heterogeneous communication architecture for the smart grid,” *IEEE Network*, vol. 25, no. 5, pp. 30–37, sep 2011. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/65/6033025/06033033.pdf?tp={&}arnumber=6033033&isnumber=6033025http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=6033033&queryText{%}253DHeterogeneous+Communication+Architecture+for+the+>
- [135] K. K. Gagneja and K. E. Nygard, “Heuristic clustering with secured routing in heterogeneous sensor networks,” *2013 IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking, SECON 2013*, pp. 51–58, 2013.
- [136] P. Guturu and R. Dantu, “An impatient evolutionary algorithm with probabilistic tabu search for unified solution of some NP-hard problems in

- graph and set theory via clique finding,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 38, no. 3, pp. 645–666, 2008.
- [137] L. Hu, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, O. Klein, and W. Stormer, “Optimal New Site Deployment Algorithm for Heterogeneous Cellular Networks,” *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6092846>
- [138] E. Yaacoub and Z. Dawy, “LTE BS Placement Optimization Using Simulated Annealing in the Presence of Femtocells,” *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*, pp. 1–5, 2014.
- [139] E. Inga and R. Hincapié, “Matched Channel Allocation for Advanced Metering Infrastructure based on Cognitive Mobile Virtual Network Operator,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 14, no. 4, pp. 1780–1785, 2016.
- [140] B. Shin, J. Choe, B. Kang, D. Hong, and Y. Park, “Cross-Layer Resource Allocation with Multipath Routing in Wireless Multihop and Multichannel Systems DIVERSITY GAIN,” vol. 13, no. 3, pp. 221–231, 2011.
- [141] M. S. Rad and M. Shafiee, “A mobility-aware cross-layer congestion control, routing and scheduling design in ad-hoc wireless networks,” *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2008*, pp. 191–200, 2008.
- [142] X. Wang, Z. Ning, L. Guo, Y. Peng, and W. Hou, “Key technology and solution to improve throughput in wireless mesh networks,” *2010 International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA)*, pp. V1–549–V1–553, 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5636766>
- [143] W.-c. Liao, M. Hong, and Z.-Q. T. Luo, “Max-Min Network Flow and Resource Allocation for Backhaul Constrained Heterogeneous wireless Networks,” *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 845–849, 2014.

- [144] M. Kasparick and G. Wunder, "Combining cost-based queueing control with resource allocation in wireless networks," *2012 16th International ITG Workshop on Smart Antennas, WSA 2012*, pp. 209–216, 2012.
- [145] P. Jun, L. Zheqin, J. Fu, M. Jianjiang, and H. Zhiwu, "The cross-layer cognitive routing with load balance in heterogeneous wireless mesh networks," *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2011*, pp. 60–65, 2011.
- [146] J. B. Ernst and M. K. Denko, "A review of cross-layer scheduling and resource allocation for wireless mesh networks," *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)*, pp. 776–781, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5444393>
- [147] W. Chunde, P. Zhiwen, Y. Xiaohu, W. Ping, H. Honglin, and Z. Yong, "Cost design for cross-layer resource allocation in cognitive radio ad hoc networks," *2009 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, no. 3, pp. 1–4, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5371405>
- [148] M. Cao, X. Wang, S. J. Kim, and M. Madihian, "Multi-hop wireless backhaul networks: A cross-layer design paradigm," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 4, pp. 738–747, 2007.
- [149] E. Inga-Ortega, A. Peralta-Sevilla, R. C. Hincapie, F. Amaya, and I. Tafur, "Optimal Dimensioning of FiWi Networks over Advanced Metering Infrastructure for the Smart Grid," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2015 IEEE PES*, pp. 1–6, 2015.
- [150] 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, pp. 106–115, 2017. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052017000100106&script=sci_abstract
- [151] G. Iyer, P. Agrawal, and R. Cardozo, "Analytic model and simulation study for network scalability in smart utility networks," in *2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, nov

- 2013, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6698786&newsearch=true&queryText=Analyticmodelsimulationstudyfornetworkscalabilityinsmartutilitynetworks>
- [152] A. Ting, D. Chieng, K. H. Kwong, and I. Andonovic, “Optimization of Heterogeneous Multi-radio Multi-hop Rural Wireless Network,” *Communication Technology (ICCT), 2012 IEEE 14th International Conference on*, pp. 1159 – 1165, 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6511372&newsearch=true&queryText=OptimizationofHeterogeneousMulti-radioMulti-hopRuralWirelessNetwork>
- [153] H. L. Nguyen and U. T. Nguyen, “Bandwidth efficient multicast routing in multi-channel multi-radio wireless mesh networks,” in *Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09. International Conference on*, oct 2009, pp. 1–8. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/5340227/5345316/05345568.pdf?tp=&arnumber=5345568&isnumber=5345316http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=5345568
- [154] E. Inga-Ortega, A. Peralta-Sevilla, R. C. Hincapie, F. Amaya, and I. Tafur Monroy, “Optimal dimensioning of FiWi networks over advanced metering infrastructure for the smart grid,” *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, pp. 30–35, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7381125>
- [155] I. Senturk, K. Akkaya, and F. Senel, “An effective and scalable connectivity restoration heuristic for Mobile Sensor/Actor Networks,” in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, dec 2012, pp. 518–523. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6503165/>
- [156] S. Shakkottai, X. Liu, and R. Srikant, “The Multicast Capacity of Large Multihop Wireless Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 6, pp. 1691–1700, dec 2010. [Online]. Available: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/ielx5/90/5669974/05481977.pdf?tp=&arnumber=5481977&isnumber=5669974http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5481977&queryText{┽}the+multicast+capacity+or+large+multihop+wireless>

- [157] K. Holmberg and D. Yuan, “Constraints on Paths Solved by Column Generation A Multicommodity Network-Flow Problem with Side Constraints on Paths Solved by Column Generation,” *INFORMS Journal on Computing*, no. May 2015, 2003.
- [158] I. Ghamlouche, T. G. Crainic, and M. Gendreau, “Cycle-Based Neighbourhoods for Fixed-Charge Capacitated Multicommodity Network Design CAPACITATED MULTICOMMODITY NETWORK DESIGN,” *Operations Research Publication*, no. June 2014, 2003.
- [159] T. Gabriel, A. Frangioni, and B. Gendron, “Bundle-based relaxation methods for multicommodity capacitated fixed charge network design,” *Discrete Applied Mathematics*, vol. 112, pp. 73–99, 2001.
- [160] T. G. Crainic, “Service network design in freight transportation,” *European Journal of Operational Research*, vol. 122, pp. 272–288, 2000.
- [161] C. Barnhart and P. H. Vance, “USING BRANCH-AND-PRICE-AND-CUT TO SOLVE ORIGIN- DESTINATION INTEGER MULTICOMMODITY FLOW PROBLEMS,” *Operations Research*, vol. 48, no. 2, pp. 318–326, 2000.
- [162] L.-m. Munguía, S. Ahmed, D. A. Bader, G. L. Nemhauser, V. Goel, and Y. Shao, “Computers & Operations Research A parallel local search framework for the Fixed-Charge Multicommodity Network Flow problem,” *Computers and Operation Research*, vol. 77, pp. 44–57, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2016.07.016>
- [163] J. F. Victoria, H. M. Afsar, C. Prins, F. Victoria, and R. Marie, “Column Generation based heuristic for the based heuristic for based heuristic for the the Time-Dependent Time-Dependent Demand,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 526–531, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.684>
- [164] P. T. Xiangyong Li, Kai Wei, Y.P. Aneja, “Design-balanced Capacitated Multicommodity Network Design with Heterogeneous Assets,” *Omega*, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2016.05.001>
- [165] G. H. A. Domínguez, “Real-time parallel routing for telecom networks: Graph algorithms and bulk-synchronous parallel acceleration,” in *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2016, pp. 1–4.

- [166] P. Gianessi, L. Alfandari, L. Létocart, and R. Wolfler, “A column generation based heuristic for the multicommodity-ring vehicle routing problem,” *Transportation Research Procedia* 12, vol. 12, no. June 2015, pp. 227–238, 2016.
- [167] T. Gabriel, Y. Li, and M. Toulouse, “A first multilevel cooperative algorithm for capacitated multicommodity network design,” *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp. 2602–2622, 2006.
- [168] L. Xiao, S. Member, M. Johansson, and S. P. Boyd, “Simultaneous Routing and Resource Allocation Via Dual Decomposition,” *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, vol. 52, no. 7, pp. 1136–1144, 2004.
- [169] I. Ghamlouche, T. G. Crainic, and M. Gendreau, “Path Relinking , Cycle-Based Neighbourhoods and,” *Annals of Operations Research*, pp. 109–133, 2004.
- [170] T. G. Crainic, “A Slope Scaling / Lagrangean Perturbation Heuristic with Long-Term Memory for Multicommodity Capacitated Fixed-Charge Network Design,” *Journal of Heuristics*, pp. 525–545, 2004.
- [171] B. Gendron and B. Gendron, “An Efficient Matheuristic for the Efficient Matheuristic for the Efficient Matheuristic for the Efficient Matheuristic for the Network Multicommodity Fixed-Charge Network,” *International Federation of Automatic Control*, pp. 117–120, 2016.
- [172] D. A. I. Weibin, S. U. N. Xiaoqian, and W. Sebastian, “Finding Feasible Solutions for Multi-Commodity Flow Problems,” in *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference July 27-29, 2016, Chengdu, China*, 2016, pp. 2878–2883.
- [173] Y. K. Agarwal and Y. P. Aneja, “Fixed charge multicommodity network design using p-partition facets,” *European Journal of Operational Research*, vol. 0, pp. 1–12, 2016.
- [174] B. Mahvash, A. Awasthi, and S. Chauhan, “A column generation based heuristic for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints,” *International Journal of Production Research*, vol. 7543, no. September, pp. 1–18, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1231940>

- [175] M. Mrad and M. Haouari, "Optimal solution of the discrete cost multicommodity network design problem," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 204, no. 2, pp. 743–751, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2008.07.031>
- [176] K. Kobayashi, "Computational Results on Some Shortest Path Problems with Side Constraints," in *SICE Annual Conference 2008*, 2008, pp. 959–963.
- [177] F. Alvelos and J. M. V. D. Carvalho, "An Extended Model and a Column Generation Algorithm for the Planar Multicommodity Flow Problem," *Wiley InterScience*, 2007.
- [178] B. Thiongane, J.-f. Cordeau, and B. Gendron, "Computers & Operations Research Formulations for the nonbifurcated hop-constrained multicommodity capacitated fixed-charge network design problem," *Computers and Operation Research*, vol. 53, pp. 1–8, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.013>
- [179] H. Masri, S. Krichen, and A. Guitouni, "A multi-start variable neighborhood search for solving the single path multicommodity flow problem," *APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATION*, vol. 251, pp. 132–142, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.10.123>
- [180] J. Molson and J. Molson, "Based Heuristic Heuristic for the Capacitated Capacitated Vehicle Vehicle Routing Routing Based for the Problem with Three-dimensional Loading Constraints Generation Based Heuristic Capacitated Vehicle with Three-dimensional Loading Constraints A Column C," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 448–453, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.122>
- [181] M. Hewitt, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh, M. Hewitt, G. L. Nemhauser, and M. W. P. Savelsbergh, "Capacitated Fixed-Charge Network Flow Problem Combining Exact and Heuristic Approaches for the Capacitated Fixed-Charge Network Flow Problem," *INFORMS Journal on Computing*, no. June 2014, 2010.
- [182] H. Tempelmeier, "A Column Generation Heuristic for Dynamic Capacitated Lot Sizing with Random Demand under a Fillrate Constraint," *IEEE*

International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1246–1250, 2010.

- [183] C. Joncour, S. Michel, R. Sadykov, D. Sverdlov, and F. Vanderbeck, “Column Generation based Primal Heuristics,” *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 36, pp. 695–702, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.endm.2010.05.088>
- [184] A. Akbalik and Y. Pochet, “Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs,” *European Journal of Operational Research*, vol. 198, no. 2, pp. 412–434, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.026>
- [185] A. L. N. and J.-J. Salazar-González, “Stronger multi-commodity flow formulations of the Capacitated Vehicle Routing Problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 000, pp. 1–9, 2015.
- [186] H. Tempelmeier, “A column generation heuristic for dynamic capacitated lot sizing with random demand under a fill rate constraint,” *Omega*, vol. 39, no. 6, pp. 627–633, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2011.01.003>
- [187] I. Rodríguez-martín and J. J. Salazar-gonzález, “Computers & Operations Research A local branching heuristic for the capacitated fixed-charge network design problem,” *Computers and Operation Research*, vol. 37, no. 3, pp. 575–581, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2008.09.003>
- [188] V. Kouhdaragh, “A Heterogeneous Communications Network for Smart A Heterogeneous Communications Network for Smart,” Ph.D. dissertation, Università di Bologna, 2017.
- [189] S. Ping, “Performance Analysis for Cognitive Radio Networks,” Ph.D. dissertation, King’s College London, 2016.
- [190] Z. Li, “Home Area Networks for Smart Grid Communications,” Ph.D. dissertation, The University of Texas at Arlington, 2014.
- [191] C. E. M. Rottondi, “The Automatic Metering Infrastructure of Smart Grids,” Ph.D. dissertation, Politecnico Di Milano, 2013.

- [192] A. Peralta, E. Inga, and R. Hincapié, “FiWi Network Planning for Smart Metering Based on Multistage Stochastic Programming,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 13, no. 12, pp. 3838–3843, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7404917&newsearch=true&queryText=FiWiNetworkPlanningforSmartMeteringBasedonMultistageStochasticProgramming>
- [193] E. Inga, R. Hincapie, C. Paidá, and S. Espinosa, “Optimal geographic placement of PMU for Wide Area Measurement System,” *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2016*, 2016.
- [194] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, “Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid,” *Communications and Computing (COLCOM), 2014 IEEE Colombian Conference on*, pp. 1–6, 2014.
- [195] J. Inga-ortega, E. Inga-ortega, and C. Gómez, “Electrical Load Curve Reconstruction required for Demand Response using Compressed Sensing Techniques,” *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*., 2017.
- [196] D. A. Perez Cruz, E. M. Inga Ortega, and R. Hincapie, “Optimal sizing of a network for smart metering,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 5, pp. 2114–2119, 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7530403/>
- [197] A. P. Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, “Optimum Deployment of FiWi Networks using Wireless Sensors based on Universal Data Aggregation Points,” *Communications and Computing (COLCOM), 2015 IEEE Colombian Conference on*, pp. 1–6, 2015.
- [198] E. Inga and R. Hincapié, “Creación de artículos académicos basados en minería de datos y Web 2.0 para incrementar la producción científica en ingeniería,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 10, no. 20, pp. 65–74, 2015. [Online]. Available: <http://www.educacioneningeneria.org/index.php/edi/article/view/567/277>{%}0A<http://www.educacioneningeneria.org/index.php/edi/article/view/567>

- [199] J. Inga, E. Inga, R. Hincapié, and C. Gómez, “Evaluación de la Infraestructura de Medición y la Respuesta de la Demanda,” *Revista Técnica Energía*, no. 12, pp. 262–269, 2016.