



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ESTUDIO DE LA PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO PARA EL
SEGMENTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE AVANZADA EN LA CIUDAD DE
BIBLIÁN USANDO LORAWAN

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: SANTIAGO MAURICIO IDROVO CALLE

TUTOR: ING. JUAN PAÚL INGA ORTEGA, MGT.

Cuenca - Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Santiago Mauricio Idrovo Calle con documento de identificación N° 0302115886, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 26 de febrero del 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santiago Idrovo Calle', enclosed within a blue circular scribble.

Santiago Mauricio Idrovo Calle

0302115886

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Santiago Mauricio Idrovo Calle con documento de identificación N° 0302115886, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Estudio de la planificación y dimensionamiento óptimo para el segmento de medición inteligente avanzada en la ciudad de Biblián usando LoRaWAN”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de febrero del 2022

Atentamente,



Santiago Mauricio Idrovo Calle

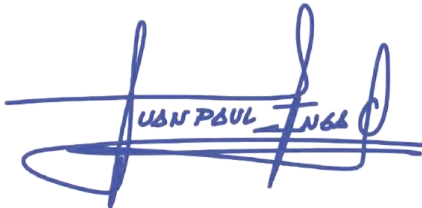
0302115886

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Paúl Inga Ortega con documento de identificación N° 0104166491, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO PARA EL SEGMENTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE AVANZADA EN LA CIUDAD DE BIBLIÁN USANDO LORAWAN, realizado por Santiago Mauricio Idrovo Calle con documento de identificación N° 0302115886, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de febrero del 2022

Atentamente,



Ing. Juan Paúl Inga Ortega, Mgt.

0104166491

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar mis estudios, quiero dar las gracias a la vida por permitirme culminar con éxito este proyecto y otorgarme la satisfacción de alcanzar una meta.

De especial manera quiero agradecer a mis padres: Mauricio y María de Lourdes, por brindarme su apoyo y la oportunidad de culminar mis estudios.

A mis abuelos: Antonio y Rocío, Fausto y Clementina por estar en cada etapa de mi vida, gracias por preocuparse por mí, por compartir su sabiduría y mostrarme el camino. Gracias abuelos.

A la Universidad Politécnica Salesiana, a los profesores y profesoras por compartir sus conocimientos con tanta generosidad.

A mi tutor de tesis: Ing. Juan Inga, MgT., por brindarme su asesoramiento profesional para culminar con éxito esta investigación.

DEDICATORIA

Dedicatoria de Santiago

A mi ser interior...

Por ser, por estar y permanecer.

Por la fortaleza para comenzar cuando el camino se hace largo y seguir avante sin

desmayar.

Por hacer posible cada paso a paso de y en esta ruta llamada vida. Por la paciencia

para saber esperar.

Por llevarme a la fuente de inspiración y motivar mi superación

Dedicado a la vida misma por regalarme tiempo para hacer de este sueño una

realidad.

Índice General

Índice General	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Objetivos	VIII
Antecedentes o Problema de Estudio	IX
Justificación	XII
Introducción	1
1. Dimensionamiento en Smart Grids, Revisión	4
1.1. Smart Grid SG	6
1.1.1. Desafíos clave para las redes eléctricas existentes	7
1.1.2. Arquitectura para Smart Grid	8
1.2. Tecnologías y paradigmas esenciales para SG	10
1.2.1. Infraestructura de Medición Avanzada AMI	11
1.2.2. Comunicaciones en AMI	13
1.2.3. Red de Sensores Inalámbricos (WSN)	15
1.3. Importancia de dimensionar y planificar una WSN	17
<i>ÍNDICE GENERAL</i>	I
1.4. Tecnología LoRa como una solución para AMI	18
2. Evaluación de la tecnología LoRa	19
2.1. Modulación LoRa	19
2.1.1. Propiedades de la modulación LoRa	21
2.2. LoRaWAN	21
2.3. Dispositivos finales en LoRaWAN	23
2.4. Formatos de Mensajes Físicos - Clase A	24
2.4.1. Formatos de Mensajes MAC - Clase A	25

2.5. Activación de Dispositivos Finales.....	26
2.6. Evaluación de las Capacidades de la Tecnología LoRa	28
2.7. Pruebas de los equipos LoRa en Laboratorio	29
3. Modelo de Dimensionamiento para WSN con tecnología LoRa para AMI	31
3.1. Formulación del Problema	32
3.2. Aplicación del Modelo de Dimensionamiento	32
4. Análisis de Resultados.....	40
4.1. Optimización de DAPs por sectores Teselados	40
4.2. Planificación ante un posible despliegue	59
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	61
Glosario	63
Referencias	65

Índice de Figuras

1.	Flujo jerárquico de la red eléctrica convencional de diferentes dominios [1, 2].	2
1.1.	Estructura de (SG) por capas [1].	8
1.2.	Arquitectura de red para SG end-to-end [2].	10
1.3.	Infraestructura de comunicaciones de una (SG) [3].	11
1.4.	Comunicaciones en una infraestructura de medición inteligente [4]	14
2.1.	Espectrograma de diferentes chirps a un BW= 125 kHz [5]	20
2.2.	Arquitectura de comunicación en LoRaWAN	22
2.3.	Protocolo LoRaWAN [6]	23
2.4.	Estructura física de uplink [7]	24
2.5.	Estructura física de Downlink [7]	25
2.6.	Estructura física de Downlink [7]	25
2.7.	Formato de Mensaje LoRa [7]	26
2.8.	Estructura formada por el kit de desarrollo	29
2.9.	Transmisiones realizadas en la prueba de la tecnología	30
4.1.	Teselación obtenida de la heurística basada en Voronoi y Delaunay	41
4.2.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 1 para cada capacidad	42
4.3.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 2 para cada capacidad	42
4.4.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 3 para cada capacidad	43
4.5.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 4 para cada capacidad	44
4.6.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 5 para cada capacidad	45
4.7.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 6 para cada capacidad	46
4.8.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 7 para cada capacidad	46
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>		IV
4.9.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 8 para cada capacidad	47
4.10.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 9 para cada capacidad	48
4.11.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 10 para cada capacidad	49
4.12.	Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 11 para cada capacidad	49

4.13. Concentradores usados para el Segmento 1	51
4.14. Concentradores usados para el Segmento 2	52
4.15. Concentradores usados para el Segmento 3	52
4.16. Concentradores usados para el Segmento 4	53
4.17. Concentradores usados para el Segmento 5	54
4.18. Concentradores usados para el Segmento 6	55
4.19. Concentradores usados para el Segmento 7	55
4.20. Concentradores usados para el Segmento 8	56
4.21. Concentradores usados para el Segmento 9	57
4.22. Concentradores usados para el Segmento 10	57
4.23. Concentradores usados para el Segmento 11	58
4.24. Modelo de optimización en toda la Zona de estudio	60

Índice de Tablas

1.1. Red convencional Vs. Smart Grid	7
1.2. Parámetros para tecnología inalámbrica en WSN	17
2.1. Descripción de los campos del mensaje	25
2.2. Descripción de las claves y direcciones almacenadas en el dispositivo final	27
2.3. Capacidades de acuerdo a las velocidades de transmisión	28
3.1. Variables implicadas en el modelo de Optimización	33
3.2. Variables implicadas en las Heurísticas para los algoritmos 1 y 2	37
4.1. Capacidades de acuerdo a las velocidades de transmisión	50

Resumen

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) y el internet de las cosas (IoT) han tomado gran interés en la innovación tecnológica de diversos paradigmas como es el caso las redes eléctricas inteligentes o Smart Grid (SG) a través de su segmento en la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). Para el desarrollo de AMI es entonces necesario que se pueda analizar su dimensionamiento y planificación de manera que se puedan optimizar y explotar de la mejor forma posible los recursos energéticos. Esto ha motivado el estudio del dimensionamiento óptimo de las WSN en AMI y este trabajo a través del caso de estudio del dimensionamiento de una red WSN basada en LoRaWAN para la ciudad de Biblián en Ecuador presentando la propuesta de planificación para el despliegue de AMI en el sector mencionado. Así, este trabajo usa los modelos de dimensionamiento óptimo con restricciones de capacidad y cobertura combinados con heurísticas que permiten resolver el problema *Set Cover* para el total de abonados de la localidad de estudio. Para lograrlo, se identifican las características físicas que necesita LoRa para su operación adecuada dando respuesta a los requerimientos mínimos que SG necesita. En los resultados se muestra una propuesta de despliegue usando teselación para relajar el problema de dimensionamiento debido a la cantidad de abonados y considerando que se presenta una propuesta tanto para el sector urbano como rural de la localidad de estudio. Además, se indica una posible planificación para el despliegue de la red en el sector sujeto al estudio de los posibles radios de cobertura que se pudiesen aprovechar.

Palabras clave: AMI; DAP; Dimensionamiento; HAN; LoRa; LoRaWAN; MILP; NAN; Planeación; Smart Grid; Smart Metering; WSN.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT) have taken great interest in the technological innovation of various paradigms such as Smart Grids (SG) through its segment in the Advanced Metering Infrastructure (AMI). For the development of AMI it is then necessary to analyze its sizing and planning in order to optimize and exploit energy resources in the best possible way. This has motivated the study of the optimal sizing of WSNs in AMI and this work through the case study of the sizing of a WSN network based on LoRaWAN for the city of Biblián in Ecuador presenting the planning proposal for the deployment of AMI in the mentioned sector. Therefore, this work uses the optimal sizing models with capacity and coverage constraints combined with heuristics that allow solving the *Set Cover* problem for the total number of subscribers of the locality of study and simplifying the computational complexity when solving the problem. To achieve this, the physical characteristics that LoRa needs for its proper operation are identified, responding to the minimum requirements that SG needs. The results show a deployment proposal using tessellation to relax the dimensioning problem due to the number of subscribers and considering that a proposal is presented for both the urban and rural sectors of the locality under study. In addition, a possible planning for the deployment of the network in the sector subject to the study of the possible coverage radii that could be exploited is indicated.

Keywords: AMI; DAP; HAN; LoRa; LoRaWAN; MILP; NAN; Dimensioning; Planning; Smart Grid; Smart Metering; WSN.

Objetivos

Objetivo General

- Realizar un estudio de la planificación y dimensionamiento óptimo para el segmento de medición inteligente avanzada en la ciudad de Biblián usando LoRaWAN.

Objetivos específicos:

- Realizar un estado del arte del uso de tecnología LoRa para Smart Grid
- Geo-referenciar los abonados y postes para el uso de la red eléctrica de la ciudad de Biblián provincia de Cañar, Ecuador.
- Aplicar modelos matemáticos de dimensionamiento óptimo para la ubicación de concentradores en base a la cobertura, capacidad, interferencia y el número de canales que permite la tecnología LoRa.
- Planificar el posible despliegue de la red de comunicaciones para el segmento de AMI en la ciudad de Biblián.
- Probar la tecnología LoRa y presentar una propuesta de red adecuada para el uso de la tecnología para el segmento de AMI de Smart Grid

Antecedentes

Ericsson una de las principales empresas de telecomunicaciones estima que existirán alrededor de 29 mil millones de dispositivos conectados para 2022; entre ellos, 18 mil millones corresponderán al paradigma del Internet de las cosas (IoT del inglés Internet of Things) [1, 8, 9, 10], este concepto se ha visto usado para una variedad de tecnologías que de manera general buscan conectar diversos objetos físicos con Internet buscando mejorar la calidad de vida de las personas [6]. La principal diferencia entre el Internet tradicional y el Internet de las Cosas es que, en IoT los dispositivos tienen menos recursos disponibles como memoria, potencia de procesamiento, ancho de banda y energía, es así entonces que existen un número limitado de aplicaciones según las necesidades creadas [9].

Por otra parte, en los recientes años se ha visto como en países tales como China o EEUU, los requerimientos energéticos se incrementan con el desarrollo económico y el crecimiento social. Es de aquí donde se intentan distribuir de mejor manera los recursos para desarrollar un nuevo sistema de distribución energética conformado de la integración de las tecnologías modernas de sensado, comunicación, información, computación y control con la red física de distribución de energía para así mejorarla [11, 12].

Al tener una idea general, se permite el planteamiento de la necesidad e importancia de construir una red inteligente (SG del inglés Smart Grid) que permita aprovechar de una forma mucho mejor y más eficiente los recursos. Entonces, en cuanto a la energía eléctrica, se debe integrar una generación y acceso a energía limpia con sistemas de subestación, transmisión y distribución inteligentes, de tal forma que se permita el funcionamiento de dispositivos de medición, monitoreo y protección avanzados permitiendo la recopilación de información sobre el consumo de

electricidad y comunicación [11]. Entonces, para que una *Smart Grid* pueda funcionar, es necesario que se integre una red de telecomunicaciones a la red eléctrica, por tanto, esta rama de las Ingenierías son pieza fundamental para dar soporte a una SG. En los recientes años se ha visto en China el desarrollo de distintos tipos de sistemas de comunicación e información, así como líneas eléctricas, comunicaciones inalámbricas y ópticas, esto permite tomar un punto de partida gracias a las ventajas y desventajas en la construcción de una SG permitiendo así identificar diferentes grados de aplicación [11].

Entonces, una SG tiene diferentes segmentos y el segmento de la medición inteligente avanzada (AMI del inglés Advanced Measurement Infrastructure) es de alto interés en lo que respecta a la etapa de distribución de la red eléctrica. Para el despliegue de AMI y la red de área de vecindaria (NAN del inglés Neighborhood Area Network) existen diversos protocolos de comunicación para su operación, por lo cual, las redes de sensores y las tecnologías en las que se basa IoT pasan a tomar importancia [13]. Además, han emergido nuevos protocolos y tecnologías como las Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia (LPWAN del inglés Low Power Wide Area Network) [14], que permite el desarrollo de redes de área amplia con la inclusión de puertas de enlace o Gateways que permitan adaptar parámetros como la tasa de transmisión, potencia, modulación, etc, de tal manera que los dispositivos finales, llamados nodos (sensores) sean eficientes en cuanto al gasto energético permitiendo su integración en cualquier aplicación IoT.

De esta manera LPWAN se muestra como una de las soluciones emergentes para LPWAN, que mejora la robustez contra la interferencia y ayuda a luchar contra la característica de fuerte desvanecimiento por trayectos múltiples para la propagación en interiores y entornos urbanos aumentando considerablemente las distancias de transmisión [15], esto hace a la tecnología ideal para las aplicaciones de monitoreo ya que desarrolla un modelo de comunicación de un salto introducido por lo que la arquitectura de la red se simplifica y resuelve la mayoría de los problemas encontrados con las redes inalámbricas de varios saltos [16].

Es así que, para una infraestructura de medición inteligente, “*smart metering*”, entran en comunicación los consumidores del suministro eléctrico y las empresas

de distribución, por tanto **AMI** debe constar de medidores inteligentes, sistemas de monitoreo de hardware y software que den paso a la gestión de los datos generados, para implementar un óptimo funcionamiento de las partes se tiene que recopilar información de los clientes y la distribución de la empresa, lo cual lleva a la planeación y dimensionamiento de los usuarios que se deben cubrir para el despliegue de la **NAN** de acuerdo factores como cobertura y capacidad que permite la tecnología inalámbrica, gracias a esto se permite minimizar el consumo en la red inalámbrica y mejorar la calidad de la recopilación de información utilizando de manera óptima las tecnologías de comunicación [17]. Cabe mencionar que una infraestructura de **AMI**, no solo se busca leer o enviar datos hacia la oficina central como es en el caso de lectura inteligente, también se busca enviar órdenes a cada medidor inteligente (**SM** del inglés Smart Meter) para poder aplicar cortes de energía y reconexión de los **SM**.

Las diferentes empresas eléctricas del Ecuador están en constante búsqueda por poder integrar los sistemas eléctricos con sistemas de comunicaciones para poder aprovechar de los beneficios que las **SG**. En este sentido, en la ciudad de Biblián, siguen existiendo fallos y mejoras por realizar, permitiendo así el estudio para un posible despliegue del segmento de **AMI**, implementando las nuevas tecnologías inalámbricas que permitan el desarrollo de una red de sensores inalámbricos (**WSN** del inglés Wireless Sensors network) que permita el intercambio de información desde los medidores de consumo energético hacia la central de energía en la ciudad y viceversa [18].

Justificación

El Ecuador y diversas empresas eléctricas ya se encuentran trabajando en el despliegue de la red de Medición Inteligente Avanzada **AMI** como primer paso al desarrollo de una Smart Grid en el Ecuador [18, 19, 20] que permita la evolución de las tecnologías energéticas en el país. Por esto, diferentes grupos de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana han realizado diversos estudios y propuestas acerca de la infraestructura de la red de comunicaciones que de soporte al segmento de **AMI**. Entonces, debido a que entre los requerimientos de *Smart Grid* está el uso eficiente de los recursos, es necesario que se analice y estudie el dimensionamiento y planificación óptima de la red de comunicaciones, razón por la cual, este trabajo busca establecer una propuesta para el despliegue óptimo de una red de comunicaciones para **AMI** y por tanto dimensionar y planificar la propuesta de red de acuerdo al total de abonados existentes en una ciudad [17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. No obstante, hace falta establecer un caso de estudio que integre diversos modelos de dimensionamiento aplicados en un contexto en particular haciendo uso de alguna tecnología de comunicación inalámbrica que permitiese la optimización de recursos que de demanda **SG**.

Por otra parte, en la ciudad de Biblián existen sectores de media y baja densidad poblacional que corresponden a sectores suburbanos y rurales, teniendo un sistema de registro tradicional de medición de consumo energético en los abonados de la red eléctrica [30], por lo cual, **LoRaWAN** se muestra como una tecnología de interés gracias a las distancias que puede manejar [31]. Es necesario mencionar que, en la actualidad, existe personal dedicado a recorrer las calles de la ciudad tomando nota de los medidores eléctricos, y por las distancias que a veces se debe recorrer, solamente se aplica una estimación a partir del promedio del consumo de energía

de los últimos meses. Además, frente al confinamiento producido por la pandemia del SARS-Cov2 (COVID19), se muestra evidente la necesidad de crear un método de medición inteligente que permita una lectura en verdad real del consumo de energía eléctrica de parte de los usuarios.

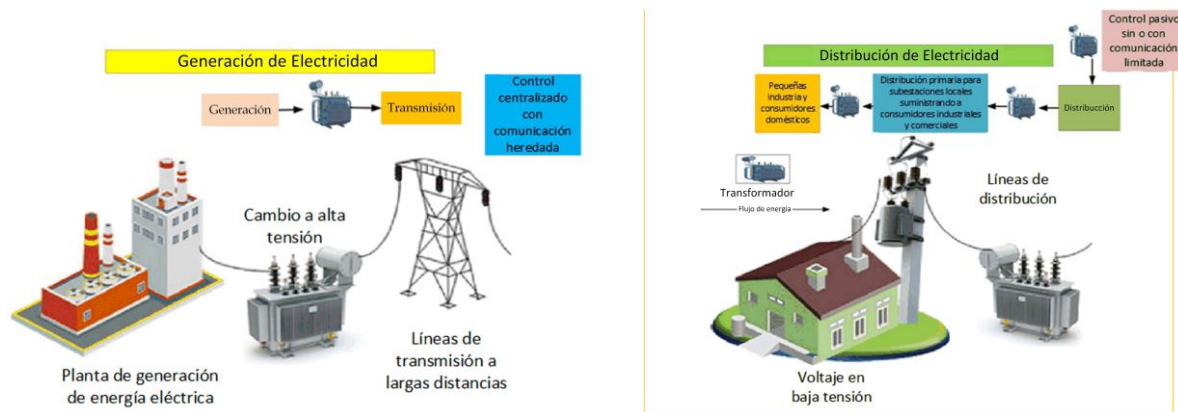
Por todo lo mencionado, este trabajo busca presentar una estrategia estructurada de dimensionamiento y planificación de la red de comunicaciones para el segmento de [AMI](#) a través de un caso de estudio aplicado al posible despliegue en la ciudad de Biblián usando en específico la tecnología de [LoRaWAN](#).

Introducción

La electricidad al ser uno de los pilares de nuestra sociedad, genera dependencia para el funcionamiento de actividades esenciales como economía mundial y según la Administración de Información de Energía se proyecta que el uso de energía aumente en un 50 % para 2050 [32].

La red eléctrica “tradicional” se caracteriza por un flujo de energía unidireccional; no cuenta con intercambio de información, generación masiva centralizada, monitoreo y control ineficientes de las redes de distribución de energía, mostrando falta de flexibilidad y accesibilidad a nuevas soluciones innovadoras. En este sentido, la figura 1 muestra de forma general una red eléctrica tradicional donde el flujo de energía sigue un patrón jerárquico y es funcionalmente unidireccional. Por otra parte, la figura 1(a) muestra que la energía se genera desde la planta de generación pretendiendo el control centralizado con comunicaciones heredadas y se muestra como se suministra al dominio de distribución a través de una red de transmisión de electricidad de alto voltaje. En en 1(b) el dominio de distribución, la energía se transmite a los clientes a través de subestaciones y una red de distribución de baja tensión con comunicaciones limitadas [2]. Esto muestra que el desarrollo de sistemas de control, supervisión y monitoreo en tiempo real cada uno dotados de una protección inteligente y diseñados para optimizar la producción y el consumo de electricidad es parte del enfoque para mejorar la eficiencia general y garantizar la confiabilidad de la red [1]. De hecho, de acuerdo con el Departamento de energía de U.S. (DOE, del inglés Department of Energy) analiza que hay grandes oportunidades de ahorro energético al optimizar recursos de acuerdo con: *“Si la red fuera solo un 5% más eficiente, el ahorro de energía equivaldría a eliminar de forma permanente las emisiones de combustible y gases de efecto invernadero de 53 millones de automóviles. Considere esto también: si cada hogar en*

América reemplazara solo una bombilla incandescente con una bombilla fluorescente compacta, el país conservaría suficiente energía para iluminar 3 millones de hogares y ahorraría más de \$ 600 millones al año. Claramente, hay excelentes oportunidades para mejorar” [33].



(a) Etapa de generación de electricidad (b) Etapa de distribución de electricidad Figura 1: Flujo

jerárquico de la red eléctrica convencional de diferentes dominios [1, 2].

Bajo este concepto, grandes países como Alemania se ha convertido líder mundial en el desarrollo e implementación de energía solar fotovoltaica. Japón se ha movido de manera similar a la vanguardia de la automatización de la distribución mediante el uso de tecnología avanzada de almacenamiento de baterías. No obstante, para lograr que estos aspectos de optimización de recursos puedan ser explotados, demanda la existencia de enlaces de telecomunicaciones que permita el transporte oportuno de la información de monitoreo en cada segmento de la red eléctrica, de aquí, el nacimiento de las redes eléctricas inteligentes (SG del inglés Smart Grid) de las que ya se mencionaron en la sección de antecedentes.

Así, la Unión Europea tiene una agenda de “Smart Grid” aún más agresiva, un componente importante de la cual tiene edificios que funcionan como centrales eléctricas [33]. De esta manera al existir muchas funciones de una red eléctrica inteligente, la infraestructura de medición inteligente se muestra como el primer paradigma para convertir una red actual a una SG, ya que implica un flujo bidireccional de información entre la empresa eléctrica de distribución y el usuario final [21], [24]. Esto ha motivado al desarrollo del presente trabajo con el objeto de describir en forma estructurada el despliegue de la red de comunicaciones que da soporte a AMI

INTRODUCCIÓN

mostrando el estudio del empleo de la tecnología **LoRaWAN** como una solución para este segmento aplicado a la ciudad de Biblián como caso de estudio. Es necesario indicar que las soluciones que se propongan en cuanto a diseño y planificación de una red de sensores inalámbrica (**WSN** del inglés **Wireless Sensor Network**) que es el tipo de red de comunicaciones para **AMI** cambian dependiendo de si se trata de brindar una solución en un caso urbano, suburbano o rural [34].

En la primera parte de este trabajo se describen las características esenciales que embarcan el concepto **Smart Grid**, así como una descripción de lo que una Infraestructura de medición inteligente pretende ofrecer entre los usuarios finales y las empresas de distribución de energía eléctrica, así como también la importancia de las comunicaciones que deben existir en esta infraestructura, también se muestra como las redes de sensores inalámbricos desarrollan un papel fundamental para esta.

En la segunda parte se realiza una descripción general de la tecnología **LoRa**, así como brindar una descripción de los conceptos que involucran el protocolo de comunicaciones **LoRaWAN**, identificando los tipos de dispositivos finales y como estos se activan dentro del entorno, también se muestra cómo se evalúan las capacidades y velocidades que permiten las transmisiones dentro de este protocolo, indicando como se ha probado la tecnología con los equipos de laboratorio para validar estas capacidades.

En la tercera parte se muestran los modelos dimensionamiento y optimización aplicados para una **WSN** dispuesta al segmento **AMI** para la ciudad de Biblián, identificando las variables y los métodos de resolución para dichos modelos, de esta forma se emiten los resultados de evaluación, proponiendo un modelo de despliegue de acuerdo a lo optimizado, recomendando el uso de equipos disponibles con la tecnología implicada en el mercado internacional.

En la cuarta parte se exponen los resultados obtenidos para finalmente en la quinta parte esbozar las conclusiones del presente trabajo.

Capítulo 1

Dimensionamiento en Smart Grids, Revisión

El sistema de energía eléctrica y su infraestructura han revolucionado nuestro mundo al ser el mayor invento y logro de ingeniería, colocándolo en la historia como uno de los grandes avances en el siglo XX a pesar de que nuestras redes eléctricas continúan operando, utilizando tecnologías y sistemas anticuados en muchos casos, la red eléctrica tradicional ha sido una solución eficaz durante más de 50 años [1]. Sin embargo, nuestras necesidades de consumo energético incrementan haciendo que este paradigma de red enfrente serios desafíos al no ser capaz de cumplir los requerimientos de la civilización moderna. En este sentido, la creciente penetración de energías renovables intermitentes debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la búsqueda por responder a necesidades emergentes como el uso generalizado de vehículos eléctricos o evitar apagones debido a las limitaciones de la red, nuevas tecnologías aumentan la oportunidad de flujos de electricidad bidireccionales donde la energía fluye desde la planta de generación hasta el cliente, y viceversa [2], [11], [21]. Estas expectativas hacen que se requiera una solución para usar la electricidad de manera sostenible, llevándonos a implementar el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) para revisar la red eléctrica y como tal, su generación, transporte y distribución ya que este debe ser un sistema plenamente funcional y eficiente [1], [22], [31]. Entonces, los desafíos y las nuevas expectativas esperadas de la red eléctrica determinan la necesidad de que todos

CAP 1. DIMENSIONAMIENTO EN SMART GRIDS, REVISIÓN

estos servicios evolucionen a uno de manera eficiente y coordinada, estimulando a la adopción de nuevas tecnologías llevando a transformar el sistema de energía actual en una red más inteligente [1], [21], [35].

Cuando se involucra el tema *Smart Grid*, se hace referencia a una red inteligente que administra y distribuye la energía eléctrica de una manera más eficiente, económica y segura, gracias a que esta integra varias tecnologías, productos y servicios a la red de generación, transmisión y distribución, es así que los sistemas y componentes existentes deben encapsularse y reorganizarse para que sea compatibles con los nuevas innovaciones e inteligencia agregada, permitiendo establecer segmentos según las necesidades dentro de una SG, estos pueden ir desde fallas en los equipos, limitaciones de capacidad, accidentes y catástrofes naturales que suelen ser los principales causantes de interrupciones y cortes de energía [36], [37].

Es así que SG propone un modelo dinámico con una arquitectura de comunicación inteligente que comienza en la transmisión de información desde los sensores o dispositivos inteligentes a medidores inteligentes y luego pasa a los centros de control, es de aquí que por parte de las comunicaciones las redes inalámbricas WSN se presenta como una de las áreas más investigadas para SG gracias a las ventajas ofrecidas en cobertura e instalación; para esto se ha visto al Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST del inglés National Institute of Standards and Technology) como el pionero en establecer expectativas y requisitos involucrados con el concepto *Smart Grid* involucrando a las tecnologías inalámbricas, algunas de estas se muestran a continuación [37]:

- Haciendo que la energía sea altamente confiable.
- Incrementar la capacidad y eficiencia de las centrales eléctricas.
- Habilitar el auto-control y la auto-curación.
- Habilitación del mantenimiento automatizado.
- Disminuir las emisiones de gases con autos eléctricos y nuevos recursos energéticos.
- Aumento del nivel de seguridad del sistema de la red eléctrica.

- Suministro de selección de consumidores.
- Ayudando a nuevas aplicaciones, productos y sistemas.

1.1. Smart Grid SG

De acuerdo con la definición proporcionada en [33] de acuerdo con el Departamento de Energía de los EE. UU. (DOE), una SG se requiere conocimientos del funcionamiento básico de los protocolos de comunicación adecuados a cada segmento del sistema eléctrico identificando dónde se utilizan y por qué. En este sentido, hay muchos sistemas que comprenden el sistema más grande de la “Red Inteligente”, que utilizan protocolos comunes y abiertos, así como muchos protocolos altamente especializados y diseñados para ser eficientes y confiables con el fin de respaldar la economía en la automatización y el control industrial estableciendo requisitos operativos de grandes sistemas de control distribuido. También, los protocolos industriales están diseñados para operaciones en tiempo real ya que requieren resultados deterministas con disponibilidad continua. En conjunto, esta combinación de redes que pueden ser abiertas y/o propietarias permite tener una red mucho más grande de control, medición y automatización conocida como la red inteligente SG. La combinación de todos estos sistemas y redes dispares juegan un factor importante en las preocupaciones de seguridad cibernética que enfrenta la red inteligente en la actualidad [38].

Desde un punto de vista práctico, la visión anterior requiere el despliegue generalizado de dispositivos “inteligentes” (sensores, actuadores, electrodomésticos inteligentes, medidores inteligentes, computadoras integradas, etc.) que sean capaces de recopilar información en tiempo real detallada sobre los patrones de uso de la electricidad y el estado de los recursos energéticos distribuidos y otros componentes de la red eléctrica. Esta enorme cantidad de información heterogénea que recogen las infraestructuras de medición y monitorización que se incorporarán en una red inteligente debe ser compartida de forma fiable y segura con multitud de sistemas de gestión de energía distribuida. Estos sistemas son responsables de analizar los datos recibidos, predecir y detectar posibles problemas (por ejemplo, fallas, escasez de energía, perturbaciones) y tomar decisiones para controlar y optimizar las operaciones del sistema eléctrico [3].

1.1.1. Desafíos clave para las redes eléctricas existentes

La clave para convertir las redes eléctricas existentes en SG de próxima generación es diseñar una infraestructura de red de comunicación robusta que permita acoplarse a inconvenientes con las redes eléctricas existentes como: (1) configuración arquitectónica inconexa; (2) limitaciones de ancho de banda para la comunicación bidireccional; (3) problemas de interoperabilidad entre componentes de red basados en proveedores; y (4) manejo ineficiente de grandes ráfagas de datos generadas por una gran cantidad de dispositivos inteligentes [2]. Es por lo que SG requiere necesariamente técnicas de coordinación y control más sofisticadas. Se ha observado que hace algunos años las empresas de servicios públicos América comenzaron a introducir sistemas de lectura automática de medidores (AMR del inglés advanced meter reading) en sus redes de distribución para recopilar datos de forma remota de los medidores (registros de consumo, alarmas) en las instalaciones de los clientes [39]. No obstante, este tipo de sistemas AMR generalmente se han desarrollado utilizando infraestructuras de comunicación unidireccionales simples que no permiten el control generalizado de una red eléctrica [3], [40]. De acuerdo con lo mencionado la tabla 1.1 muestra las características clave y las principales diferencias entre las redes eléctricas convencionales y SG [2].

Tabla 1.1: Red convencional Vs. Smart Grid

	Red convencional	Smart Grid
Propiedad del flujo de potencia	unidireccional	bidereccional
Perfil de generación	centralizado	distribuido
Configuración de la red	Radial	Red
Integran recursos energéticos distribuidos (DER)	Muy raro	Frecuente
Dispositivos de sensado	Pocos	Muchos
Monitoreo	vista restringida	Auto-monitoreo
Control	Limitado y pasivo	Penetrante y activo
Recuperación de interrupción	Manual	Auto-reconfiguración

1.1.2. Arquitectura para Smart Grid

Para entender “Smart Grid” es importante comprender cómo se estructura al ser una interconexión extremadamente compleja de múltiples sistemas donde muchos de ellos son sistemas individuales y también complejos; cada uno se basa en componentes de generación,

transmisión, distribución y medición más nuevos e inteligentes. Entonces, comprender los componentes individuales y cómo están interconectados y desplegados, ayudará a identificar los alcances de una red inteligente. En este sentido, algunos autores indican la importancia de poder interpretar y establecer una arquitectura adecuada de operación que garantice la funcionalidad de SG basado en tres sistemas principales básicos: energía, comunicación e información [38]. Es decir, el diseño y el análisis de SG requiere una visión fundamental del impacto de la topología para la red eléctrica y el control de red integrado empleando conceptos para manejar grandes cantidades de datos. Además, es esencial tener una idea de la complejidad que puede presentarse en la interacción entre la capa física y la capa cibernética donde se encuentran los sistemas informáticos, de comunicación y de información de apoyo, de esta forma los sistemas que comprenden una SG requieren de una arquitectura que se puede representar como una estructura en capas de acuerdo a lo mostrado en la figura 1.1 donde sus cinco principales serían: arquitectura del sistema, control de distribución, aplicaciones, estándares y medidas de ciberseguridad [1].



Figura 1.1: Estructura de (SG) por capas [1].

Por lo tanto, una comprensión de la arquitectura SG proporciona una guía sobre los requisitos para las redes de comunicación SG. En este sentido, diferentes organizaciones de estandarización como el DOE [33], el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) [41], han desarrollado arquitecturas SG conceptuales. Sin embargo, el estándar IEEE 2030-2011 ha sido ampliamente aceptado con el afán de cumplir los requisitos en arquitectura SG y

configuración e interoperabilidad [42]. Dentro del estándar IEEE 2030-2011, se propone un modelo operativo llamado red eléctrica inteligente y modelo de referencia de interoperabilidad (SGIRM del inglés Smart Grid and Interoperability Reference Model) para tratar los problemas de interoperabilidad entre los diferentes componentes de la red de comunicación, el sistema de energía y la plataforma de tecnología de la información.

Por su parte, SGIRM proporciona una guía para la comunicación entre los dominios de generación, transmisión y distribución de SG [2], [42] en la figura 1.2 se muestra una arquitectura de red SG End-to-End de acuerdo a IEEE. No obstante, el estándar IEEE 2030-2011 aunque busca asegurar que se dé la interoperabilidad y estandarización para SG hasta 2030, también está permitiendo que las diferentes marcas de SM puedan usar etiquetas o algún tipo de bloqueo para evitar que el sistema de gestión de datos de una marca use los datos leídos con SMs de alguna marca diferente, aunque la tecnología usada sea la misma.

Dicho esto, se puede decir que SG consta de dos partes principales, la infraestructura del SG y las aplicaciones y operaciones inteligentes.

Infraestructura del SG: Esta infraestructura implica un sistema de energía inteligente, el uso de TICs y un sistema de comunicación que: admiten la conectividad de comunicación entre dispositivos o subsistemas de la red, y permiten la distribución de información y comandos dentro del sistema de energía, teniendo como requisitos básicos para dicha infraestructura de comunicación la escalabilidad, fiabilidad, puntualidad y seguridad [1], [3].

Aplicaciones y operaciones de SG: En cuanto a las aplicaciones, estas se clasifican en áreas fundamentales y emergentes. Las áreas fundamentales se refieren a estrategias

de gestión energética, modelos de fiabilidad, seguridad, privacidad y gestión de la demanda (DSM del inglés Demand-side management).

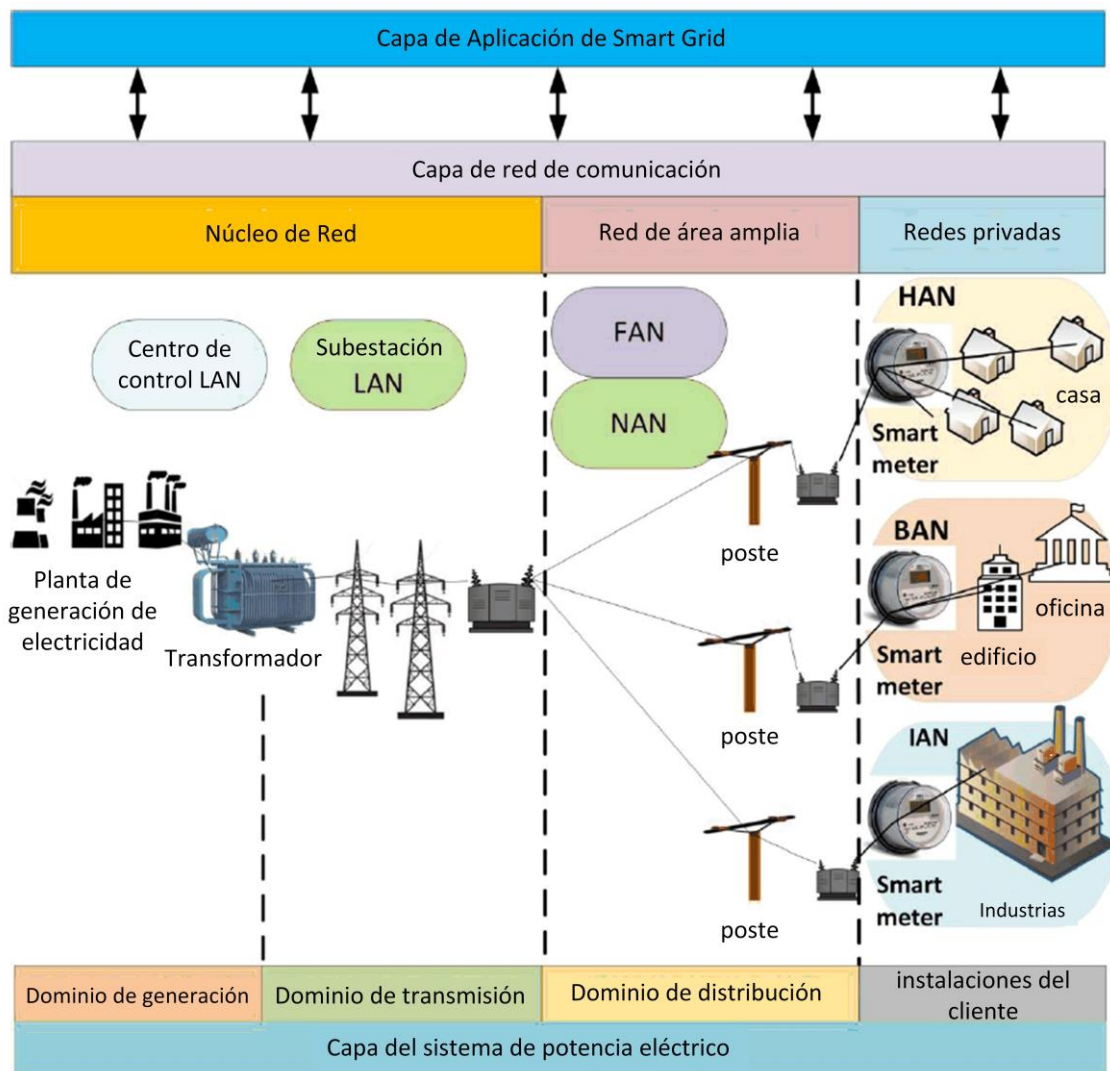


Figura 1.2: Arquitectura de red para SG end-to-end [2].

1.2. Tecnologías y paradigmas esenciales para SG

Aunque existen puntos de vista un tanto diferentes sobre el modelo final de una red inteligente SG, se ha formado un consenso sobre las nuevas tecnologías y segmentos que son esenciales para el despliegue exitoso de una red inteligente, siendo los más destacados: infraestructura de medición avanzada, recursos energéticos distribuidos, micro-redes inteligentes y tecnologías de vehículo a red [3]. De estos segmentos, este trabajo se

concentrará el soporte de comunicaciones para el segmento de AMI debido a ser el tema de interés en este estudio; en la figura 1.3 se observa cómo deben coexistir las tecnologías y paradigmas de SG.

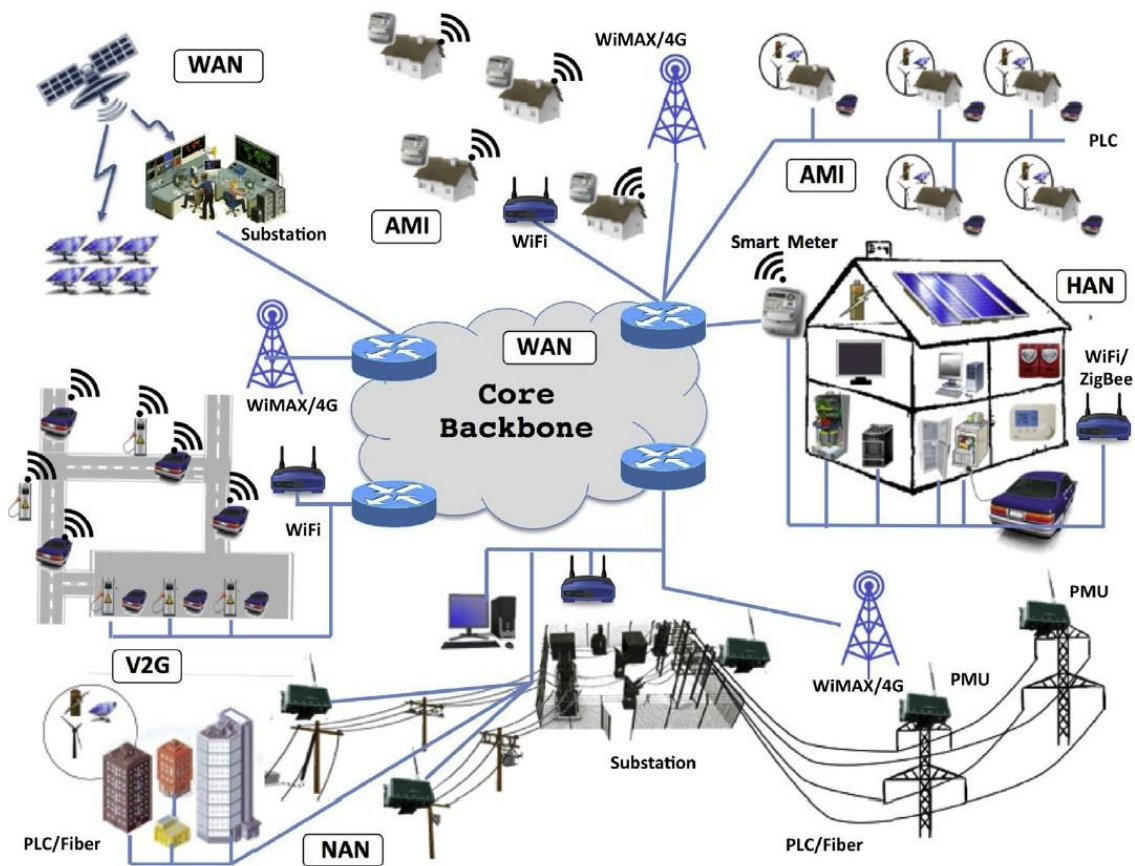


Figura 1.3: Infraestructura de comunicaciones de una (SG) [3].

1.2.1. Infraestructura de Medición Avanzada AMI

Una Infraestructura de Medición Avanzada AMI corresponde al conjunto de sistemas que permiten la transmisión de información relevante entre las empresas de servicios públicos (oficina central) y los clientes mediante el uso de sensores en tiempo real y es la base para que otros segmentos de SG puedan aplicarse y/o mejorarse.

En lo que respecta a AMI, su despliegue puede darse en etapas. Una primera etapa es el caso de lectura inteligente también llamada *smart metering*. En general se usa AMR haciendo referencia a la infraestructura que permite transportar información únicamente en sentido ascendente debido a la medición inteligente y SR al concepto de medición inteligente

del inglés Smart Reading) donde el flujo de información es en una sola dirección, desde los nodos sensores (usuarios) hacia la oficina central. Así, en SR se permite el uso de la información obtenida en las lecturas para generar notificaciones de cortes de energía, por ejemplo a través de servicios telemáticos como mensajes por Telegram y se permite también el monitoreo de la calidad de la energía, brindando a los consumidores y empresas de servicios públicos, información sobre el costo y el uso de la electricidad, incluido el tiempo y la cantidad de electricidad utilizada [1], [38]. En una segunda etapa o etapa final, está el caso de AMI, donde además de incluir los servicios comentados para SR, se proponen también servicios como corte y reconexión remota de manera que se pueda tomar acción sobre el SM aplicando entonces comunicación bidireccional.

Debe indicarse que la lectura de energía a través de un medidor de energía tradicional corresponde a un muestreo de una vez al mes en el mejor de los casos (caso ecuatoriano) y el consumo eléctrico mensual se estima a través del registro histórico previo correspondiente, por lo tanto, al cambiar el medidor tradicional por un medidor inteligente (SM del inglés Smart Meter) se pasa a tomar y transmitir muestras cada 7 o hasta cada 15 minutos por lo que el pago de las planillas de consumo eléctrico es mucho más aproximado a lo real. Además, al conocer el estado real de consumo energético de cada usuario es posible la gestión de la predicción y respuesta a la demanda (DER del Inglés Demand Response) en busca de que se genere tan solo lo que se estima consumir en cada temporada del año [1], [43].

Por lo tanto, AMI requiere una infraestructura de red de comunicaciones en dos vías para medición inteligente, la misma que será constituida por los medidores inteligentes, sistemas de monitoreo, de hardware, de software y del sistema de gestión de datos medidos (MDMS del inglés Meter Data Management System) [17], los sistemas son necesarios para la recopilación y distribución de información generada entre clientes y la empresa de distribución, de esta manera (AMI) permite una amplia gama de funcionalidades como [1], [44]:

- Señales remotas de precios al consumidor, que pueden proporcionar información de precios según el tiempo de uso.

- Recopilar, almacenar e informar los datos de consumo de energía de los usuarios durante los períodos necesarios.
- Mejorar los diagnósticos energéticos a partir de perfiles de carga detallados.
- Obtener ubicación y grado de apagones de forma remota.
- Proporcionar la posibilidad de conexión y desconexión remotas.
- Permitir la identificación de robos y pérdidas de electricidad.

En AMI se requiere que la etapa de medición inteligente, se encargue de la recolección de datos de un número considerable de medidores inteligentes SMs y encuestados bajo cierto intervalos y por un determinado tiempo; así se advierte que se requeriría de un tiempo máximo de muestreo de 15 minutos para leer cada SM [23] a través de Sistemas de Gestión de Datos de Medición MDMS. Este sistema será el encargado de almacenar la información en los centros de control de las empresas de distribución, esto permite que las SG recopilen un gran volumen de datos heterogéneos de una gran cantidad de fuentes; esta gran cantidad de datos de medición se puede explotar para identificar pro-activamente las condiciones de falla y las anomalías y tomar las contra-medidas apropiadas, o implementar técnicas sofisticadas para regular los patrones de uso de la electricidad [44].

1.2.2. Comunicaciones en AMI

Para las comunicaciones en AMI se reconocen diferentes sub-redes, siendo estas: red de área doméstica (HAN del inglés Home Area Network), red de área vecinal (NAN del inglés Neighborhood Area Network) que están orientadas al intercambio de información proveniente de los medidores inteligentes SM, por supuesto, no existen reglas estrictas sobre la naturaleza exacta de la red de comunicaciones [45]. En pocas palabras, las lecturas del medidor se pueden enviar en tiempo real sin la carga adicional de requerir que alguien asista físicamente a las instalaciones del cliente con la esperanza de que alguien esté en casa, además, las lecturas serán considerablemente más precisas, también permiten que el operador tenga la oportunidad de comunicarse con el medidor en tiempo real (o casi),

cualquier problema potencial puede detectarse rápidamente y corregirse posteriormente [38].

En consecuencia, la red de área vecina **NAN** encuentra su operación a partir de lograr una conectividad inalámbrica entre los puntos de agregación de datos (**DAP** del inglés Data Agregation Point) y los **SMs**; mientras que, la red de área amplia (**WAN** del inglés Wide Area Network) se ve creada por la interconexión que puede existir entre las oficinas centrales de cada empresa eléctrica [25], el sistema **AMI** admite varios tipos de aplicaciones **SM** inteligentes, como respuesta a la demanda, carga de vehículos eléctricos y consumo de energía en pantallas domésticas [46]. La figura 1.4 muestra como todos los medidores inteligentes están conectados a un punto de agregación de datos **DAPs** que acumula todos los datos recibidos y los transmite a un centro de control.

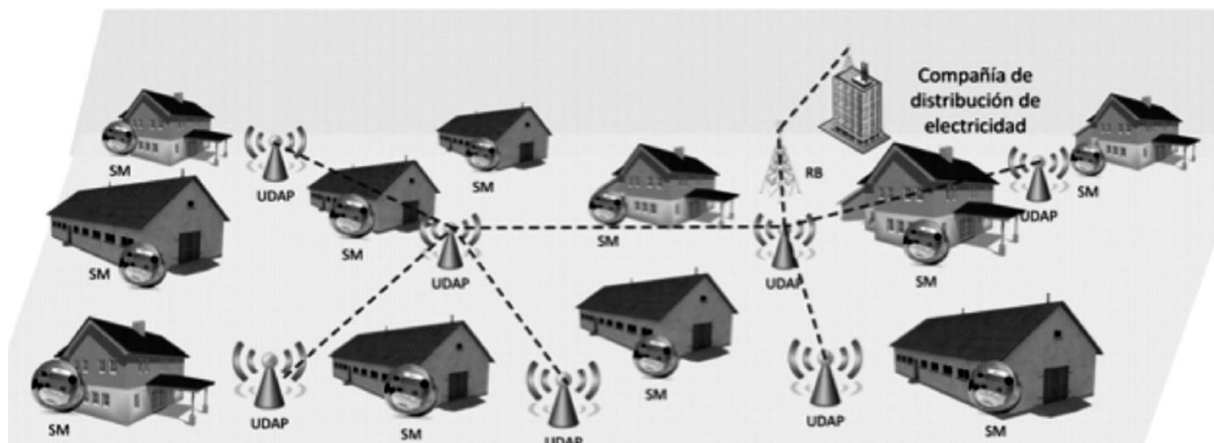


Figura 1.4: Comunicaciones en una infraestructura de medición inteligente [4]

En consecuencia, para **AMI** también se indica la importancia de considerar la naturaleza de las tecnologías que se pueden elegir como soluciones; ya que topologías de red, protocolos de comunicación, seguridad, interferencias, entre otros aspectos son determinantes para el óptimo desempeño de SG. Siguiendo esta línea de trabajo, la tecnología celular puede considerarse una opción para transferir información de última milla entre **DAPs** y las estaciones base (**BS** del inglés Base station). En cambio, para transferir información del **SM** a la **DAP** se trabajaría en una tecnología inalámbrica diferente dentro de las bandas de frecuencia de 900 MHz, 2.4 GHz o 5 GHz, dependiendo de la ubicación geográfica y

disponibilidad de los dispositivos por parte de las empresas fabricantes, para el caso se estudio se centrara en las bandas de frecuencia de 915 MHz siendo una frecuencia de uso libre [28].

Entonces en HAN los medidores inteligentes conglomeran los datos de consumo del usuario, en NAN se adapta la conformación de enlaces entre los medidores y la DAP, y en WAN se lleva a cabo el intercambio de información entre las partes que forman una SG, la empresa comercializadora de energía convencional, los operadores del mercado, las micro-redes cercanas y los usuarios a través de las estaciones base de comunicaciones celulares. Los SM y DAP pueden usar una topología de red en malla y generar saltos entre ellos para encontrar la ruta a su destino. Además, la DAP tendrían doble tecnología, una para conectarse con el Los SM y otra para conectarse con el BS cercano [28].

1.2.3. Red de Sensores Inalámbricos (WSN)

De acuerdo con [47] las WSN se definen como sensores distribuidos que monitorean parámetros físicos o ambientales y que usualmente colaboran para transportar esa información hacia servidor o un nodo central. Por lo tanto, un sensor no solo tiene un componente de detección, sino también capacidad de procesamiento, comunicación y almacenamiento de los datos [47]. Así, las WSN a través de sus nodos de sensores son un medio de acceso con la capacidad de detectar y transmitir la información para análisis en tiempo real e incluso posea capacidad de almacenamiento en el caso de que por diferentes circunstancias no pueda transmitir [48], [49]. Es así como las redes de sensores inalámbricas utilizan nuevas tecnologías y estándares que implican dispositivos pequeños de bajo consumo, co-diseño de hardware / software y soporte de redes [50], haciendo que una WSN este acoplada con el entorno y los objetivos teniendo que este trabajo pueda estar involucrado en las principales capas de desarrollo de una estructura AMI.

Ya que WSN son redes centradas en datos, el usuario define los datos requeridos en cada aplicación (tipo, ubicación, precisión, hora, etc.) y solicita a todos los nodos una respuesta sin consultar a un nodo específico la información que podría proporcionar, es así que para la automatización del diseño de WSN se debe tomar en cuenta aspectos clave como: topología, por tanto la especificidad del protocolo, las características de comunicación (ancho

de banda, rango operativo, modulación y velocidad de datos, etc.), la confiabilidad, la organización de la arquitectura y topología [51].

Por su parte, para **AMI**, al admitir diferentes tecnologías de comunicación de acuerdo al contexto y desarrollo de cada país ha resultado en el incremento de planes pilotos que contemplan tecnologías como: tecnologías de redes de área personal (**PAN** del inglés Personal Area Network), RFID, Comunicaciones Celulares, Wi-Max, Fibra Óptica, etc. Por lo tanto, el uso de una infraestructura única de principio a fin dedicada a **AMI** totalmente nueva resulta en algo inviable debido al costo que esto representaría; entonces, una respuesta se encuentra en el uso de sistemas híbridos que conglomeren diferentes tecnologías marcan el camino a seguir [23].

Así también se ha visto que considerar cada medidor inteligente como un dispositivo móvil implica que un operador de red móvil puede satisfacer las necesidades específicas de medición inteligente. Sin embargo, la planificación que se requiere para llevar a cabo la implementación del servicio llevará tiempo mayores, entonces, conectar directamente los **SM** a la red móvil sin usar concentradores puede llegar a saturar la red móvil o tener tan poco tráfico cursado que el costo de arrendamiento de la red móvil puede ser muy caro haciendo que estos incrementos de precio se vean reflejados en la facturación al usuario y no represente una ventaja económica [34].

Lo que conlleva a consideraciones acerca de usar una tecnologías de **WSN**, esta característica es interesante en Smart Metering por la facilidad de intercambiar información sobre el consumo de los dispositivos electrónicos a través de un medidor inteligente, en donde los concentrador son el punto que se conecta a internet por una infraestructura de red de operador móvil ya que el costo de tráfico cursado puede resultar mas barato, gracias a que los datos de cada nodo por individual es pequeño [34].

Por lo tanto, cuando se trabaja con **WSN** existe una clasificación de tecnologías según las distancias de rango de señal para cada red de área, por lo que los estudios de requisitos mínimos se limitan a lo que los fabricantes de dispositivos pueden ofrecer. En general, se pueden definir estándares para los parámetros que ofrecen las

1.3. IMPORTANCIA DE DIMENSIONAR Y PLANIFICAR UNA WSN

tecnologías; en este sentido, las opciones disponibles se resumen en la Tabla 1.2 con el fin de determinar cuáles se pueden aplicar en el entorno geo-referenciado. Además, múltiples investigaciones han propuesto opciones de diseño de WSN con el objetivo de optimizar los recursos de su capa física considerando restricciones como capacidad y cobertura además de evaluar estrategias de enrutamiento no solo para casos en general sino incluso relacionados con la aplicación de WSN en AMI [27], [28], [29].

Tabla 1.2: Parámetros para tecnología inalámbrica en WSN

tecnología	Standard	Velocidad de transmisión	Distancia	frecuencias de operación
Zigbee	IEE 802.15.4	256 kbps	>a 100 m	2,4 GHz, 784 MHz (China), 868 MHz (Europa), 915 MHz (EEUU y Australia)
WiFi	IEEE 802.11b/g/n	1-54 Mbps (b/g), 26-600 Mbps (n)	>a 100 m (b/g), >a 200 m (n)	2.4 y 5 GHz (b/g/n)
LoRa	-	>a 50 kbps	>a 20 Km	433/868/915 MHz

1.3. Importancia de dimensionar y planificar una WSN

Para que un sistema AMI sea escalable en su diseño, debe ser flexible en tecnología, permitiendo así la inclusión de distintos tipos de infraestructuras de comunicación para el envío y recepción de la información, entonces es importante recalcar que dicha red deberá obedecer ciertos requisitos y/o restricciones asociados al despliegue de una red de comunicaciones dedicada. Las características de la medición inteligente advierte que los sensores-medidores inteligentes son fijos y, por tanto, la colocación de sitios de concentración y agregación de datos resulta más simple; sin embargo, se debe garantizar su cobertura, con limitantes en la capacidad de cada tecnología que pudiera ser empleada [4].

De aquí que los concentradores deben ubicarse en sitios óptimos para que los costes de comunicación disminuyan y hagan de la red un sistema más eficiente para el desarrollo de AMI [28]. Entonces, buscar un dimensionamiento y óptima planificación se vuelven fundamentales, entonces se deben definir ciertas variables que delimiten la necesidad de investigar e innovar una solución apropiada que

1.4. TECNOLOGÍA LORA COMO UNA SOLUCIÓN PARA AMI

cumpla para la cobertura de usuarios posicionados geográficamente en zonas urbanas, suburbanas y rurales, así como determinar de manera automática que tecnología es factible usar al menor costo tomando a consideración la capacidad de las tecnologías inalámbricas en términos del número de SM a ser aglutinados; así como, conseguir una planeación escalable de la red de comunicaciones que gracias al uso adecuado de los recursos y garantizando la conectividad permite obtener una eficiencia en el sistema de comunicaciones en base [29], [45].

1.4. Tecnología LoRa como una solución para AMI

Por otra parte, LoRa es un esquema de modulación basado en en la técnica de “espectro ensanchado con chirps (CSS, del inglés Chirp Spread Spectrum)”, teniendo como principal objetivo mejorar la sensibilidad considerando una reducción en la tasa de datos para un ancho de banda (BW del inglés bandwidth) dado, esta aparece como solución dentro del espectro tecnológico de las WSN, las cuales requieren transmitir pocos datos usando tasas de transmisión razonablemente pequeñas que representen un bajo consumo de energía a largo alcance.

LoRa pone en efecto tasas de datos variables con el uso de factores de ensanchamiento (SF del inglés Spreading factor) ortogonales, esto permite hacer un compromiso entre tasa de datos y alcance, así como optimizar el desempeño de la red con un ancho de banda constante [14], [52].

LoRa se muestra como una implementación de capa física, lo que la hace independiente de implementaciones en capas superiores. De esta manera se permite coexistir con diferentes arquitecturas de red [52].

En el siguiente capítulo se ampliarán los principales aspectos sobre esta tecnología y por qué se muestra como una de las tecnologías interesantes para la aplicación de WSN en AMI.

Capítulo 2

Evaluación de la tecnología LoRa

Como se explicó en el capítulo 1 en la sección 2.1 la tecnología LoRa y su implementación con LoRaWAN brinda múltiples ventajas permitiendo modificar distintos parámetros para la comunicación de tal forma que se permita el manejo de distintos tamaños de mensajes al igual que distintas tasas de transmisión, es así que para permitir el dimensionamiento de una WSN basada en tecnología LoRa, debemos comprender e identificar los alcances y capacidades óptimas de acuerdo a los requerimientos de AMI

2.1. Modulación LoRa

LoRa es una tecnología basada en la técnica de espectro ensanchado con chirps CSS, donde los chirridos (también conocidos como símbolos) son los portadores de datos en la modulación LoRa, de esta manera también se declara que el factor de dispersión SF controla la tasa de chirp y, por lo tanto, a su vez controla la velocidad de transmisión de datos. Entonces, al usar factores de dispersión más bajos se obtienen chirps más rápidos y, por lo tanto, una la tasa de transmisión de datos aumenta, en la figura 2.1 se observa un espectrograma de los SF para un ancho de banda de 125 kHz en el uso de la modulación LoRa mostrando que ha mayor SF mayor duración del Chirrido. Una ventaja de este método se presenta en que las variaciones de temporización y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, resultando en una reducción en complejidad de procesamiento del receptor, de esta

2.1. MODULACIÓN LORA

manera el **BW** del chirp es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. La relación entre la tasa de datos deseada, la tasa de símbolos y la tasa de chips para LoRa, se puede expresar de la siguiente manera [53]:

En la ecuación 2.1, se define a R_b como la tasa de bits de la modulación:

$$R_b = SF * \frac{C_{digodetasa}}{BW} \quad (2.1)$$

Donde:

$$C_{digodetasa} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

En este ejemplo SF es el factor de ensanchamiento, y puede variar entre 7 y 12, CR es la tasa de codificación, que varía entre 1 y 4 y BW es el ancho de banda en Hz.

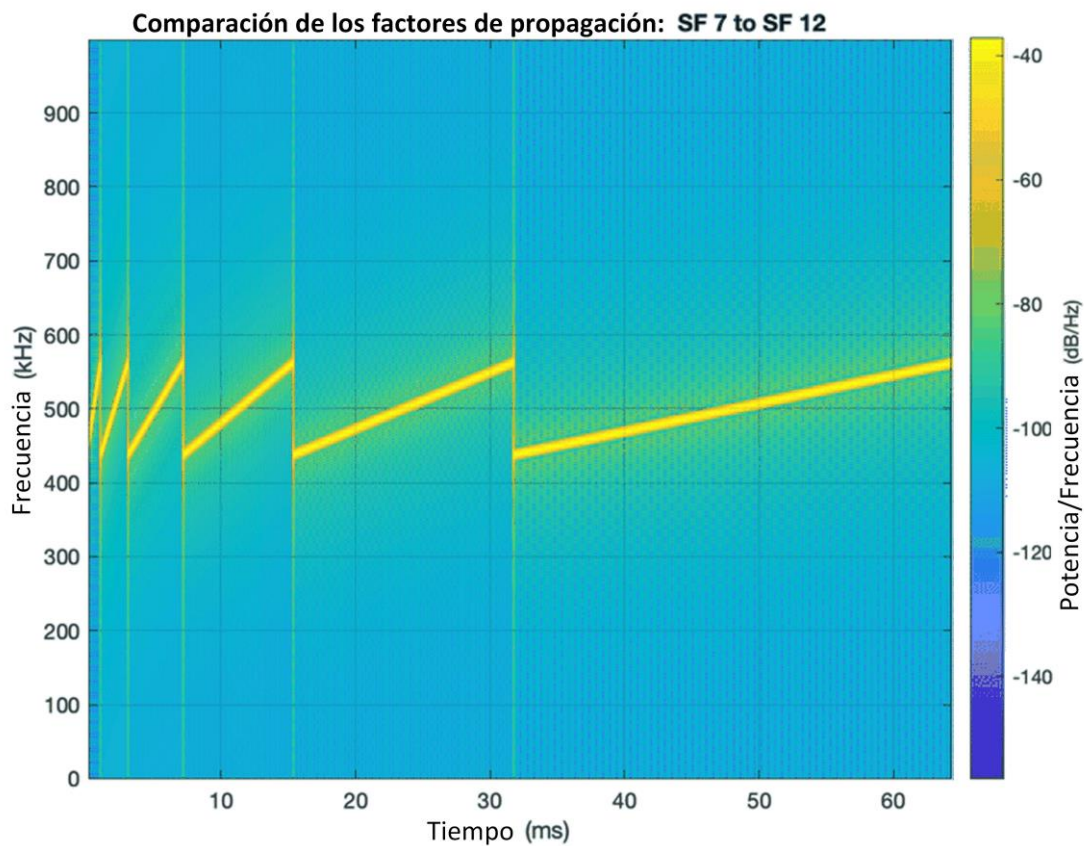


Figura 2.1: Espectrograma de diferentes chirps a un BW= 125 kHz [5]

2.2. LORAWAN

2.1.1. Propiedades de la modulación LoRa

A continuación, se muestran algunos aspectos clave que destacan a LoRa y lo convierten en el mejor candidato para AMI [52]:

- **Ancho de Banda Escalable:** Puede usarse en saltos de frecuencia de banda estrecha y en aplicaciones de secuencia directa de banda ancha.
- **Bajo Consumo Energético:** La potencia de salida puede reducirse en comparación a (FSK del inglés Frequency-shift keying) manteniendo el mismo o mejor presupuesto de enlace.
- **Alta Robustez:** De acuerdo a su naturaleza asíncrona, la señales moduladas en LoRa son resistentes a interferencias dentro y fuera de banda.
- **Resistente a Doppler:** El desplazamiento Doppler provocado en frecuencia para el impulso LoRa, introduce un desplazamiento mínimo en el eje de tiempo de la señal de banda base, lo que la hace inmune al efecto Doppler.
- **Capacidad de Amplia Cobertura:** Cuando se los compara con FSK, en las mismas condiciones de potencia de transmisión, el presupuesto de enlace es mayor en LoRa.
- **Capacidad de Red Mejorada:** La modulación de SemTech LoRa emplea SF ortogonales que permiten transmitir múltiples señales de propagación al mismo tiempo y en el mismo canal sin una degradación considerable de la sensibilidad del receptor.

Entonces, es importante mostrar que las señales moduladas bajo diferentes SF se muestran como ruido en el receptor objetivo y de esta manera son procesadas como tales.

2.2. LoRaWAN

LoRaWAN surge como un protocolo de red desarrollado por la empresa LoRa Alliance con el fin de optimizar los parámetros de **LoRa** de tal forma que

2.2. LORAWAN

generen un menor consumo energético en dispositivos finales (nodos), entonces, este protocolo genera redes centralizadas generalmente basadas en topologías de estrella en donde las puertas de enlace (GW del inglés gateways) redirigen los paquetes entre los dispositivos finales (nodos o motas) y un servidor de red central. Estas puertas de enlace se conectan al servidor de red por medio de direcciones IP, en cuanto a los dispositivos finales utilizan transmisiones de un solo salto con LoRa. Sin embargo, a pesar de tener una comunicación bidireccional, el flujo de información que corresponde al tráfico predominante se encuentra en las transmisiones desde el dispositivo final al gateway [7]. En la figura 2.2 se observa un sistema LoRaWAN.

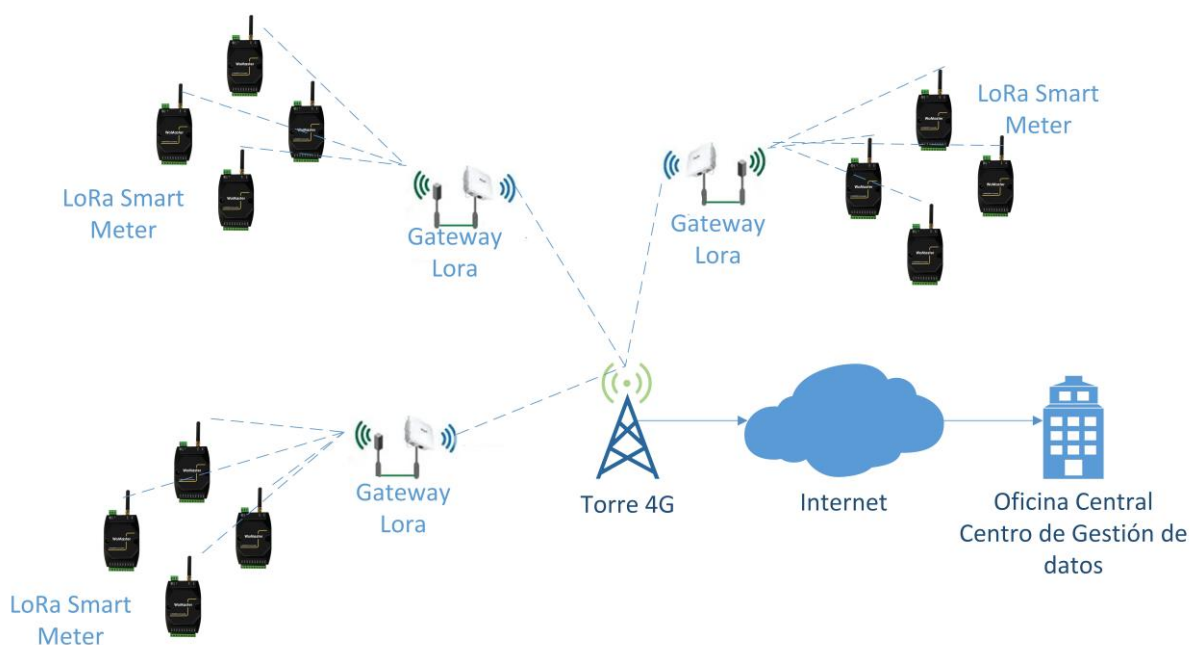


Figura 2.2: Arquitectura de comunicación en LoRaWAN

Para establecer la comunicación entre dispositivos finales y gateways se utilizan diferentes frecuencias y canales, que siguen las reglas a continuación:

- El dispositivo final cambia de frecuencia de transmisión (canal) de manera pseudoaleatoria en cada transmisión.

- El nodo final cumple con el máximo ciclo de trabajo de transmisión relativo a las regulaciones locales para la sub- banda elegida en la transmisión .

2.3. *DISPOSITIVOS FINALES EN LORAWAN*

- El dispositivo final nunca supera la máxima duración establecida para la transmisión.

La figura 2.3 muestra las capas que se usan en una transmisión con LoRaWAN,

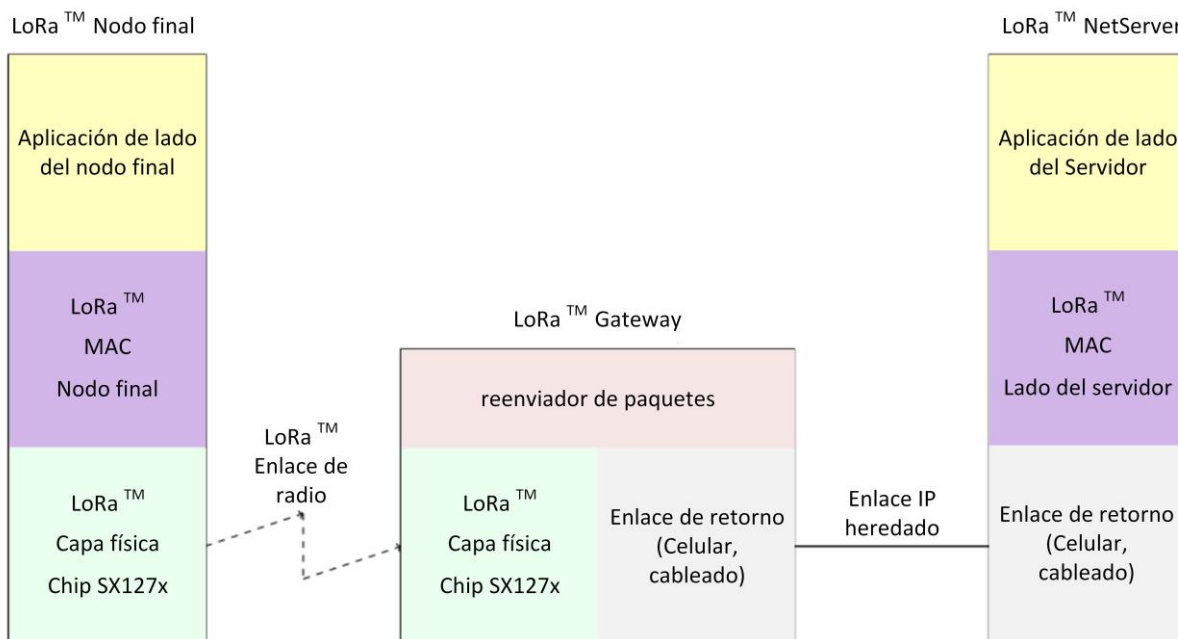


Figura 2.3: Protocolo LoRaWAN [6]

2.3. Dispositivos finales en LoRaWAN

En LoRaWAN se identifican tres clases de dispositivos finales en la red (Clase A, Clase B y Clase C) fundamentados en la capa MAC y que se prestan a la operación de manera bidireccional.

La **clase A** brinda una comunicación entre el dispositivo final y el servidor de red, siendo el dispositivo final quien inicia la petición. De esta manera para que una transmisión de enlace descendente desde el servidor de red al dispositivo final exista debe haber ocurrido una transmisión de enlace ascendente desde el dispositivo final al servidor de red.

La **clase B** se encuentra basado en el funcionamiento de la clase A, con la diferencia de tener una ventana de transmisión de enlace descendente adicional

2.4. FORMATOS DE MENSAJES FÍSICOS - CLASE A

iniciada de acuerdo con la programación. Además se utiliza una señal de baliza especial para establecer una sincronización con la programación, lo que garantiza una transmisión de datos desde el servidor de red en los momentos de sincronía.

La **clase C** permite una transmisión de enlace descendente en cualquier momento, misma que se detiene durante la transmisión ascendente desde el dispositivo final.

Es de importancia recalcar que la clase A es obligatoria para una implementación dentro de **LoRaWAN**; mientras tanto, la Clase B y la Clase C son opcionales.

2.4. Formatos de Mensajes Físicos - Clase A

En **LoRaWAN**, se identifican los mensajes uplink (nodo al servidor) y downlink (servidor al nodo).

Mensajes Uplink

Estos mensajes son creados y enviados por dispositivos finales hacia las puertas de enlace, las mismas que se encargan de reenviar los paquetes hacia el servidor. Estos mensajes utilizan un modo explícito, en el cual se incluye una cabecera física

LoRaWAN ((PHDR) del inglés physical layer headers) más un encabezado CRC (PHDR CRC). En cuanto a la integridad de la carga útil se ve protegida por el código de redundancia cíclica (CRC del inglés cyclic redundancy check). Estos encabezados son agregados por el transceptor. La estructura de un mensaje Uplink, se observa en la figura 2.4

Uplink PHY:



Figura 2.4: Estructura física de uplink [7]

Mensajes Downlink

Cada mensaje downlink es enviado por el servidor de red hacia uno de los dispositivos finales, usando un solo gateway para el reenvío, figura 2.5

2.4. **FORMATOS DE MENSAJES FÍSICOS - CLASE A**

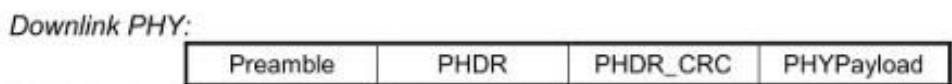


Figura 2.5: Estructura física de Downlink [7]

Ventanas de Recepción

Cuando a concluido una transmisión uplink, en el dispositivo final se abren dos ventanas de recepción cortas. Entonces, para definir el inicio se utiliza el final de la transmisión como referencia, figura 2.6.

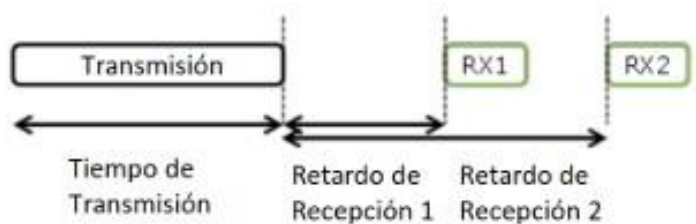


Figura 2.6: Estructura física de Downlink [7]

2.4.1. Formatos de Mensajes MAC - Clase A

Todos los mensajes uplink y downlink llevan una carga útil (PHY) que empieza por un encabezado MAC de un octeto (MHDR), continuando por una carga útil MAC (MACPayload) y al terminar un mensaje de integridad de código de 4 octetos (MIC). En la tabla 2.1, se da la descripción de las diferentes partes de las abreviaturas en los códigos que forman parte del mensaje MAC que muestra en la figura 2.7:

Tabla 2.1: Descripción de los campos del mensaje

Campo de mensaje MAC LoRa	Descripción
MHDR	Encabezado MAC, un octeto de longitud
MAC Payload	Datos de la capa superior
MIC	Código de Integridad de Mensaje, cuatro octetos de longitud
FHDR	Encabezado de trama
FPort	Campo opcional de puerto
FRMPayload	Campo opcional de carga útil de trama
Devaddr	Dirección del dispositivo
FCtrl	Octeto de control de trama

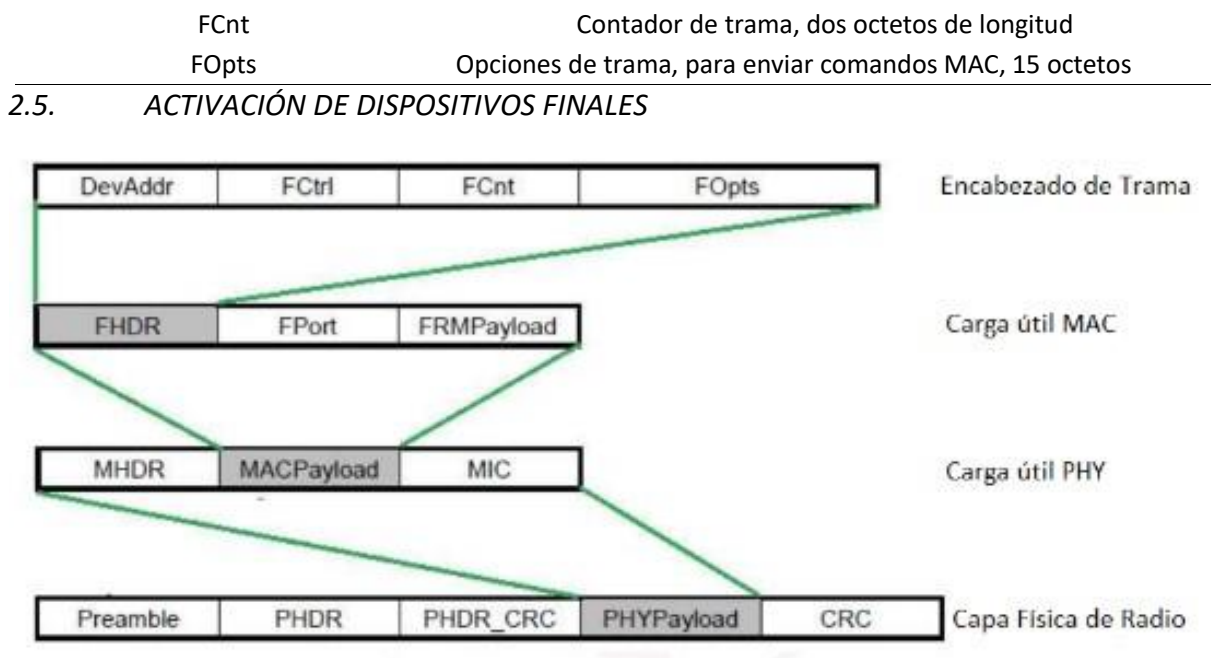


Figura 2.7: Formato de Mensaje LoRa [7]

2.5. Activación de Dispositivos Finales

Cuando se quiere formar parte de una red **LoRa**, cada dispositivo debe ser activado. Existen dos maneras en la esta activación se puede hacer: Activación en el Aire (**OTAA** del inglés Over the air activation), cuando se desea agregar un dispositivo nuevo o, Activación por Personalización (**ABP** del inglés Activation by personalization) [7].

Cuando se ha llevado a cabo la activación, la siguiente información se ve almacenada en el dispositivo final: Una dirección de dispositivo (*Devaddr*), un identificador de Aplicación (*AppEUI*), una clave de sesión de red (*NwkSKey*) y una clave de sesión de aplicación (*AppSKey*). La descripción de estas direcciones se muestra en la tabla 2.2

Activación en el Aire OTAA Para esta activación, los dispositivos finales deben seguir un procedimiento de agregación antes del envío de información con el servidor de red. Para una activación **OTAA** se requiere que el dispositivo final tenga la información de agregación antes de iniciar una transmisión, esto son: un identificador único global (*DevEUI*), el identificador de aplicación (*AppEUI*) y la clave AES-128 (*AppKey*).

2.5. ACTIVACIÓN DE DISPOSITIVOS FINALES

Tabla 2.2: Descripción de las claves y direcciones almacenadas en el dispositivo final

Clave	Descripción
DevAddr	Es una dirección que consta de 32 bits usadas para identificar al dispositivo en la red
AppEUI	Este identificador global que reconoce a una entidad capaz de procesar una trama de solicitud de agregación.
NwkSKey	Es una clave usada por el servidor de red y el dispositivo final para calcular el MIC. Además se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes MAC.
AppSKey	Esta clave se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes de datos específicos de una aplicación.

- Identificador de Dispositivo Final (DevEUI): Es una identificación global en el espacio de direcciones IEEE EUI64 que identifica de manera única al dispositivo [7].
- Clave de Aplicación (AppKey): Es una clave AES-128 única del dispositivo; cuando el dispositivo final realiza una OTAA, se utiliza la AppKey para generar la NwkSKey y AppSKey específicas del dispositivo que son usadas para encriptar y verificar la comunicación con la red [7].

El procedimiento para seguir por los dispositivos consiste en iniciar la comunicación con un mensaje de solicitud de agregación (activación) en cual se incluyen una AppEUI y DevEUI. Entonces el servidor de red responde con un mensaje de aceptación de agregación que contiene una dirección de dispositivo final (DevAddr) y un campo AppNonce que es usado por el dispositivo para calcular la NwkSKey y AppSKey [7].

Activación por Personalización ABP Existen ciertas circunstancias en donde los dispositivos finales pueden ser activados o agregados a la red por personalización. En este procedimiento se agregan los dispositivos finales directamente a la red sin la necesidad de los

mensajes de solicitud y aceptación de la red utilizados en la activación OTAA. Esta activación requiere que las claves la DevAddr y las dos claves

2.6. EVALUACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE LA TECNOLOGÍA LORA

de sesión NwkSKey y AppSKey se encuentren ya almacenadas en el dispositivo final. De esta manera cada dispositivo debe tener NwkSKey y AppSKey únicas, para no comprometer la seguridad de la comunicación de otros dispositivos. Estas claves se deben crear de tal forma que no se puedan calcular a partir de información pública [7].

2.6. Evaluación de las Capacidades de la Tecnología LoRa

De acuerdo a los requerimientos de AMI se requieren velocidades de transmisión en los rangos de 100 kbps con un mínimo requerimiento de 2 kbps [1],[54], es de aquí que para evaluar y conocer las posibles combinaciones en LoRaWAN para obtener tasas de transmisión de 3kbps,5kbps y 27 kbps, estas velocidades tienen capacidades evaluadas en [55],[56], en el cual se muestra su comportamiento en áreas urbanas, suburbanas y rurales, de aquí se han evaluado las capacidades en concordación con la densidad poblacional del área sujeta a estudio, la ciudad de Biblián corresponderá entonces a $50 \text{ us}/\text{km}^2$, que acuerdo con lo mostrado en [57] para cada velocidad de transmisión corresponderá una capacidad de acuerdo a lo mostrado en la tabla 2.3, a mas también se realiza una estimación lineal de acuerdo a la tasa de lectura de cada sensor para de esta manera se permitan establecer los radios de cobertura mínimos y máximos a los cuales se evaluará cada capacidad, estableciendo de esta forma 10 radios sujetos a estudio, desde los 400m hasta 3.6 km, como ultimo radio el alcance máximo que propone la tecnología que es de 4.7 km, además, de esta manera se pretende mostrar hasta que distancias es conveniente establecer los alcances de las transmisiones para el área de estudio de acuerdo a la tecnología propuesta para este trabajo.

Tabla 2.3: Capacidades de acuerdo a las velocidades de transmisión

Data rate	Capacidad	Alcance	SF	BW
3 kbps	72 usuarios	3.31 (Km)	7	125 kHz
5 kbps	243 usuarios	2.46 (Km)	8	125 kHz

2.7. PRUEBAS DE LOS EQUIPOS LORA EN LABORATORIO

2.7. Pruebas de los equipos LoRa en Laboratorio

Cuando se identificó las capacidades de alcance de la tecnología se usan los equipos de desarrollo LoRa Technology Evaluation Kit – 800 del laboratorio de la sede cuenca de la universidad, este kit permite establecer una red de sensores inalámbrica, gracias a sus dispositivos finales (MOTE) y a su Gateway inalámbrico, para configurar su correcto funcionamiento se deben seguir varios pasos de programación e instalación de software y hardware, que permiten tener dispositivos finales conectados a un servidor, de esta forma a través de una plataforma de control se observa el flujo de datos que genera una red inalámbrica con la tecnología LoRa en la figura 2.8 se muestra la estructura de red que se forma con esta tecnología.

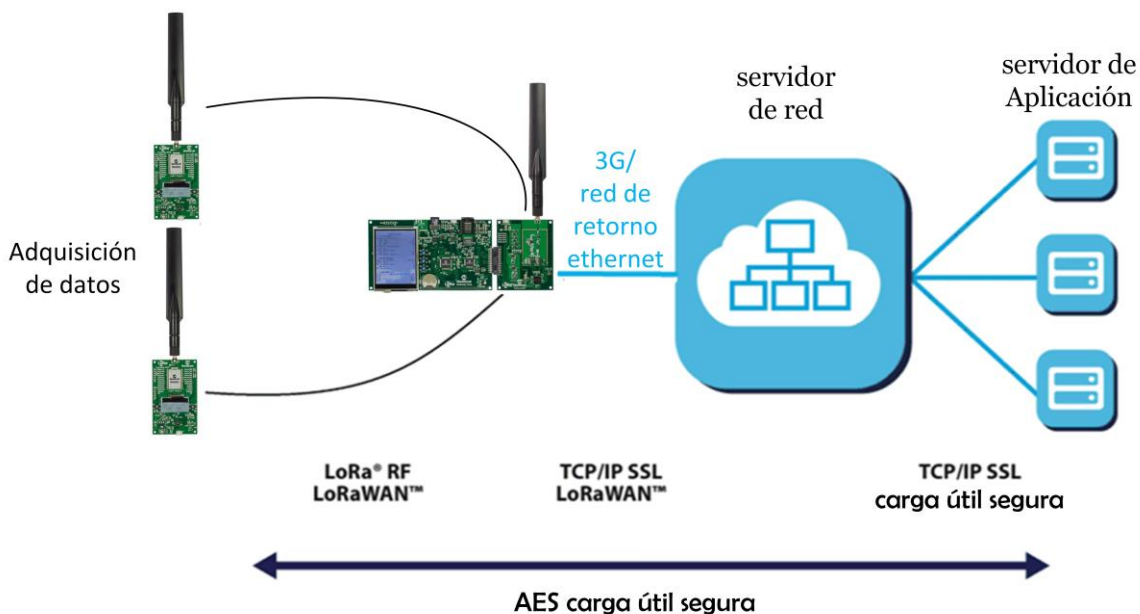


Figura 2.8: Estructura formada por el kit de desarrollo

Entonces, se han evaluado el alcance de distintas transmisiones en distintos puntos de la ciudad de cuenca, ubicando el concentrador en el edificio Cornelio Merchan de la universidad, teniendo radios de alcance evaluados desde los 349 metros hasta los 3277

metros, en la figura 2.9 se muestran los puntos en los cuales se realizaron las transmisiones hacia la ubicación del DAP.

2.7. PRUEBAS DE LOS EQUIPOS LORA EN LABORATORIO

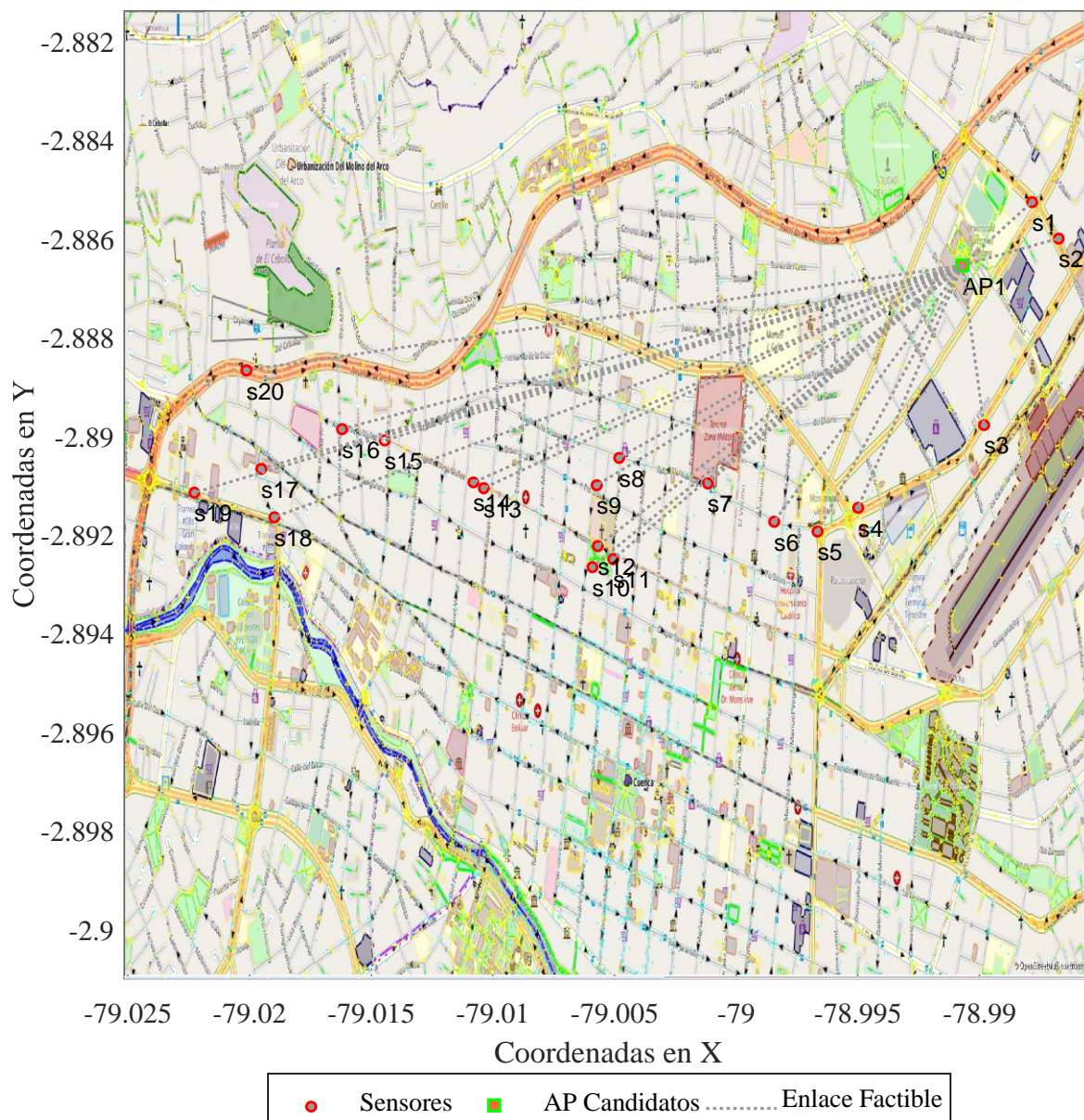


Figura 2.9: Transmisiones realizadas en la prueba de la tecnología

Capítulo 3

Modelo de Dimensionamiento para WSN con tecnología LoRa para AMI

Como se expuso en la sección 1.2.1 en AMI se debe lograr la garantía de que todos los SM ubicados en cada vivienda obtengan cobertura para realizar los procesos de lectura, cortes, re-conexiones a más de otros servicios adicionales; por lo tanto, desarrollar una solución nueva de comunicaciones que resulte en una inversión sin un costes significativos, demanda de una planeación óptima en cuanto al despliegue de una red de cobertura, gracias a las ventajas que permite WSN surge como una solución a la Infraestructura de comunicaciones NAN en AMI que requiere una cobertura del 100 % de los usuarios [25].

Los sistemas WSN pueden ser configurados en una variedad de topologías fácilmente modificables desde redes punto a punto adecuadas para áreas con bajo número de usuarios, a redes de infraestructuras enteras de miles de usuarios que permiten Roaming sobre una amplia área. Es de aquí que el dimensionamiento de las redes de sensores basando en técnicas de agrupamiento ha estado en auge los últimos años, llevando que exista un gran número de protocolos de agrupamiento de tarea específica, es de aquí que se pueden aplicar los modelos basados en las diferentes propiedades que presente una WSN para un área de cobertura específica [17],[58]. Es de aquí que la problemática a ser resuelta para WSN depende de las características a interpretación que esta debe incluir como Cobertura, Capacidad, interferencia, conectividad de la red. Para el caso de la evaluación desarrollada en este trabajo, se

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

considera una topología en estrella que es la que permite LoRa. Además, solamente se consideran estas dos restricciones ya que el modo de operación LoRa permite que un mismo mensaje sea recibido por diferentes concentradores sin comprometer la integridad del mensaje siempre que la capacidad de cada nodo sea la adecuada en el espacio de tiempo que se da entre cada nuevo muestreo de parte del nodo sensor.

3.1. Formulación del Problema

Cada concentrador **DAP** deberá tomar los datos de varios medidores de tal forma de que los enlaces sean óptimos y no se deban recorrer distancias excesivamente largas; entendiéndose que la cantidad de información o tráfico generado y las condiciones del canal de datos serán condiciones que también modifiquen el tratamiento del problema, pero esto ha sido solucionado por la capacidad de conexión que presenta la tecnología **LoRa** a través de **LoRaWAN** como se muestra en 2.2

Uno de los principales planteamientos es el uso de ubicaciones geo-referenciadas para cada uno de los equipamientos **SM** y **DAP** que se vaya a colocar, por lo tanto, la fórmula de Haversine es de gran utilidad para calcular la distancia entre dos puntos geo-referenciados. Se ha planteado un radio de cobertura R de cada **DAP** y una capacidad C de albergar hasta N usuarios (medidores inteligentes) y un número de M sitios factibles donde pueden ser colocados los **DAP** [4] [29].

3.2. Aplicación del Modelo de Dimensionamiento

El problema de la cobertura que se ha establecido corresponde a que cada **SM** debe ser cubierto por al menos un concentrador de datos o **DAP** dependiendo en forma directa de la distancia que abarca el punto de agregación. En este caso lo que se busca es atender al menos a un número de sensores o **SMs** que se encuentra en la zona de cobertura del **DAP**. Por lo tanto el problema de optimización posee una restricción en cuanto al porcentaje P de usuarios cubierto y también debe considerarse la capacidad máxima C de cada nodo concentrador para poder servir en una ventana de tiempo determinada antes de que se dé la próxima medición.

El modelo matemático lineal de optimización aplicado en este trabajo se detalla en las ecuaciones 3.1 a 3.5 mostrando la función objetivo del problema, así como sus restricciones. La tabla 3.1 presenta las variables del modelo de optimización aplicado.

Ahora, con el objeto de minimizar el número de DAPs que satisfagan la cobertura de sensores deseada, que para AMI se busca un porcentaje de cobertura P del 100 % y en consecuencia minimizar el costo por los recursos al ser desplegada la WSN [4].

Las ecuaciones del modelo de optimización lineal para el dimensionamiento de la WSN son desarrolladas en MATLAB para que a través de este se genere un archivo .lp, y así resolver el problema de optimización usando el software LPSolve que buscará una respuesta óptima usando programación lineal entera mixta (MILP por su siglas en inglés. Es así que entonces, LPSolve permite resolver el problema de optimización mas no MATLAB. Se empleó este “solver” ya que es de licencia abierta [59].

Tabla 3.1: Variables implicadas en el modelo de Optimización

Variables	Descripción
M	Número de sitios candidatos para DAP
N	Número de sensores
i	DAP
j	Sensores
Z_i	DAPs activos
$\alpha_{i,j}$	Actividad del sitio 0 no activo, 1 activo
Y_i	toma valores de 0 o 1 dependiendo si algún usuario j es cubierto por un DAP
$X_{i,j}$	representa enlaces dentro de cada DAP i con el usuario j
P	Porcentaje de cobertura de cada DAP
S	conjunto de concentradores
U	conjunto de sensores (usuarios)
C	Capacidad del DAP

La función objetivo correspondiente a minimizar la cantidad de sitios candidatos para ubica los concentradores es la ecuación 3.1 y está definida como:

$$\min \sum_{i=1}^M Z_i \quad (3.1)$$

Sujeta

a las restricciones:

$$\sum_{i=1}^N Z_i Y_i \geq N * P \quad (3.2)$$

$$Y_j = \sum_{i=1}^M X_{i,j}; \quad \forall j \in U \quad (3.3) \quad \forall i \in S$$

$$\sum_{i=1}^M X_{i,j} \leq C * Z_i \quad (3.4)$$

$$X_{i,j} \leq \alpha_{i,j} * Z_i \quad (3.5)$$

De estas restricciones se tiene que:

- I. En 3.2 se hace referencia a cuantos usuarios son atendidos al menos por un DAP y que la cantidad de usuarios supere el % de cobertura establecido.
- II. En 3.3 se hace referencia a identificar el número de enlaces estables que se van a dar, para cada uno de los usuarios con cada uno de los puntos de acceso.
- III. Con 3.4 se pretende que la cantidad de enlaces por cada DAP no deba superar la capacidad que le corresponde.
- IV. En 3.5 se muestra que para validar un enlace debe existir un DAP que puede ser usado ya tiene usuarios a quien cubrir.

Para la aplicación del modelo es necesario identificar la cantidad de sensores o abonados que deben ser cubiertos en la zona de estudio. Para este trabajo, la obtención de las coordenadas geo-referenciadas de los abonados existentes en el cantón Biblián ha sido obtenida a través de la exportación de información pública que patrocina la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS) mediante su geo-portal [30]. Así, al conocer por donde se encuentra el tendido eléctrico y las acometidas, se puede delimitar el área sujeta a estudio gracias al número de transformadores y postes que se encuentra en zona de la ciudad,

permitiendo así identificar el nombre del barrio o calle donde se encuentran estos. Para confirmar el número de abonados que son parte de Biblián considerando que gran parte de los mismos son rurales, se ha procedido a consultar en las oficinas de la EERCS ubicadas en la ciudad, identificando que la cantidad de abonados en la red eléctrica del cantón Biblián son 9300 clientes (usuarios) [30]. No obstante, para simplificar el análisis debido a las condiciones geográficas del sector, se precisa que la cantidad de elementos del conjunto de sensores N se es 7339 nodos (sensores), esto debido a que se evalúa a cada edificación como un nodo resultado de que existe más de un usuario por edificación en ciertos sectores de la ciudad, esto implica que para estos casos se encuentra útil el concepto HAN de AMI en donde se centraliza la información a un nodo en el caso de edificaciones con departamentos.

De igual manera para la validación de los sitios candidatos se realizó una visita in situ de tal forma que se permita verificar la geo-ubicación de los postes obtenidos en el plano eléctrico de la EERCS en el sector y establecer con datos reales cuales de estos postes pueden ser considerados como sitios candidatos para la ubicación de los DAPs tomando en cuenta aquellos sitios con mayor disponibilidad, así como también aquellos puntos con mayor elevación. Cabe mencionar que para la selección de postes también se ha tomado en cuenta las restricciones que la misma EERCS dispone para el uso en redes de telecomunicaciones. En cuanto a la estrategia para la ubicación de estos sitios en la zona suburbana (urbana) se ha propuesto ubicar uno cada dos cuadras en las esquinas cumpliendo así con el radio mínimo sujeto a estudio.

Para mostrar el escenario geo-referenciado, se ha tomado una imagen satelital guardada como una imagen con extensión “.png” haciendo uso de la herramienta libre de *Open Street Map* de manera que se pueda establecer los límites del sector en el cual se aplica este estudio y las posiciones de los sitios candidatos, así como de los abonados. Para presentar lo antes mencionado se ha hecho uso de las herramientas desarrolladas en MATLAB por el PhD. Esteban Inga Ortega y ajustadas al sector de estudio por el autor de este trabajo junto a su tutor.

Por otra parte, debido a la cantidad de abonados y su densidad geográfica, la cantidad de ecuaciones resultantes del desarrollo del modelo de dimensionamiento, indican que el problema de estudio de este trabajo resulta en uno de tipo combinatorio NP-Complete en

donde la óptima solución implica una complejidad computacional muy elevada [60] haciendo que le tiempo de obtención de la respuesta óptima frente al análisis de diversos radios de cobertura tome incluso hasta tres días o en otros casos mucho tiempo más (5 días por ejemplo), entonces es razonable y necesario relajar el problema de manera que se resuelvan problemas similares pero más pequeños con menos abonados basada en el concepto de “divide y vencerás”.

Como primera estrategia de relajación del problema se ha realizado una sectorización del área sujeta a estudio. Esta división en sectores en general puede aplicarse usando la sectorización de ordenamiento político que tiene la ciudad de Biblián de acuerdo con la realidad ecuatoriana, es decir, dividir por barrios o parroquias. Sin embargo, la concentración de abonados depende de la zona urbana, suburbana o rural de la ciudad y también que se identifique de manera asertiva a un abonado en la red eléctrica existente en la empresa eléctrica de acuerdo a cada casa existente en el mapa y se ha verificado que la dispersión poblacional usando esta estrategia no ofrece mayores ventajas comparando con el escenario completo de más de 7mil abonados.

Entonces, como alternativa se optó por usar un proceso de teselación para dividir el escenario en grupos donde se identifiquen los centroides desde los cuales, grupos de abonados pueden ser “concentrados”; es decir, se aplica el concepto de “clusters” de abonados. No obstante, se debe aclarar que este trabajo no usa *clusters* para definir la posición de los DAPs ya que heurísticas como *k-means* o *k-medoids*, esta última es la implementada en este trabajo, tienden a variar su respuesta al realizar una nueva ejecución para el mismo escenario. Esto último es de relevancia ya que es un aspecto importante y que permite diferenciar este trabajo de propuestas como las de [61, 62, 63, 64, 65].

Por lo tanto, este trabajo propone una heurística basada en los diagramas de Voronoi y la aplicación de la triangulación de Delaunay, el objetivo de Voronoi es que en un grupo dado de puntos P , se encontrara una región de Voronoi $V(p_i)$ al rededor del punto P_i tal que el conjunto de puntos P estén a la misma distancia. En cuanto a la triangulación de Delaunay es la línea recta dual del Diagrama de Voronoi, esto hace que se segmenten las regiones de Voronoi con líneas que lo delimiten [66].

Es de esta forma entonces que se realiza la segmentación del área de estudio para reducir el tiempo de procesamiento del algoritmo de optimización a resolver por MILP, entonces se establece la distancia entre puntos para la región de Voronoi de tal forma que no supere los 2.5 Km, para así garantizar que en los segmentos se puedan aplicar varios radios de cobertura para los DAP se obtendrá cada segmento de tal forma que se cumpla con el algoritmo 1. El valor de 2.5Km se definió de acuerdo con lo indicado en lo analizado en el capítulo 2.

Tabla 3.2: Variables implicadas en las Heurísticas para los algoritmos 1 y 2

Variables	Descripción
M	Número de sitios candidatos para DAP
N	Número de sensores
i	DAP
j	Sensores
Z_i	DAPs activos
$ C $	Número de centroides del algoritmo kmedois
$ U $	Número de usuarios en la posición de $ C $ del algoritmo kmedois
K_i	Número de segmentos
R_{max}	Radio máximo
$ U_i $	Número de usuarios del centroide $_i$
$V(U_i)$	conjunto de abonados por centroide
P	Porcentaje de cobertura de cada DAP
$Dist_{k,j}$	Matriz curzada de distancias de haversine para concentradores y usuarios
$distUsSitios$	Matriz de distancias de haversine entre concentradores y usuarios
R	Radios de cobertura
Cap	Capacidad del DAP
$conteo_i$	Número de distancias que encajan y no superan R
nUs	Número de usuario que encajan en $conteo_i$
$ocupados$	Número de concentrador que encajan en $conteo_i$
Loc	Conjunto de las ubicaciones de sensores y DAPs
L	Número de sensores y sitios candidatos
$daps$	Celda de usuarios para cada concentrador óptimo.

Como se explicó en 2.6 se requiere una capacidad máxima de abonados que puede conectar un DAP, entonces la teselación propuesta no define donde se ubica un DAP.

Para las zonas que son mucho más densas para la ubicación de los sitios candidatos se trabaja en la heurística basada en Greedy desarrollada por los miembros de GITEL PhD. Esteban Inga Ortega e Ing. Juan Inga Ortega, MgT, para resolveros los escenarios

correspondientes a los segmentos 2, 6, 10 y 11 resultados del algoritmo 1. La heurística correspondiente al Algoritmo 2 busca seleccionar el DAP que contiene la mayor cantidad de usuarios dentro de su radio de cobertura y seleccionar aquellos que son más cercanos manteniendo la restricción de capacidad para luego agregar más

Algoritmo 1 Teselación del área de estudio

Paso: 1 Definiciones Entradas:

Coordenadas Geo-referenciadas para Concentradores y Sensores: $coordN$
 $= \{(x_{S1}, y_{S1}), (x_{S2}, y_{S2}), \dots, (x_{Sj}, y_{Sj}), \dots, (x_{SM}, y_{SM})\}$;
 $coordM = \{(xd_1, yd_1), (xd_2, yd_2), \dots, (xd_i, yd_i), \dots, (xd_N, yd_N)\}$;
 $||C||$; K ;
 R_{max} ;
 $||U_i||$;
Salida: $V(||U_i||)$;

Paso: 2 Configura $K = 3$;

Paso: 3 do

$[U, C] = kmedois (CoordN, K)$ **forall** $i=1$
to M
 $U_i = \text{find} (U == i)$; **forall** $j=1$ to $||U_i||$
 $dist_{i,j} = \text{haversine} [C(i, 2) C(j, 1)], [y(U_j) x(U_j)]$; **endforall**
endforall
while $dist_{i,j} > R_{max}$ Paso:

4 Return $V(||U_i||)$;

concentradores hasta poder cumplir la restricción del porcentaje de cobertura P . Es decir, el algoritmo 2 permite resolver el problema *Set Cover* basándose en el algoritmo de *Greedy* con restricciones de capacidad y cobertura.

Algoritmo 2 Set Cover basado en Greedy con Restricción de Capacidad y Cobertura

Paso: 1 Definiciones Entradas:

Coordenadas Geo-referenciadas para DAPs y Sensores:
 $coordN = \{(x_{S1}, y_{S1}), (x_{S2}, y_{S2}), \dots, (x_{Sj}, y_{Sj}), \dots, (x_{SM}, y_{SM})\}$;
 $coordM = \{(xd_1, yd_1), (xd_2, yd_2), \dots, (xd_i, yd_i), \dots, (xd_N, yd_N)\}$;
 R ; Cap ; P ; N ; M ;

```

     $dist|dist \in R^{M \times N}$  Salida:
    daps;

Paso: 2 Configura:
     $Loc = [coordN; coordM]|Loc \in R^{M+N \times 2}$ ;
     $L = M + N$ ;

Paso: 3 forall k=1 to M forall
    j=1 to N
         $Dist_{k,j} = dist_{haver \ sin \ e} \{Loc(k), Loc(j)\}$ ;
    endforall endforall

Paso: 4  $dist(dist == 0) = \infty$ ;
     $distUsSitios(distUsSitios > R) = \infty$ ;
    flag = 1;

Paso: 5
while flag == 1 conteo = 0, donde
     $conteo \in R^M$ 
    forall i=1 to M
         $conteo_i = \sum (distUsSitios(:, i) \leq R)$ ;
    endforall
    nUs = max(conteo) ocupados =
    argmax(conteo) nro = ocupados
    concentradores = [concentradores ocupados]
    if nUs > Cap
        forall r=1 to Cap us = argmin(distUsSitios(:,
            ocupados)); usuariosr = us; distUsSitios(us,
            ocupados) =  $\infty$ ;
        endforall
    else usuarios = find(distUsSitios(:, ocupados) <  $\infty$ );
    endif
    nroUsCubiertos = nroUsCubiertos + ||usuarios|| distUsSitios(usuarios, :) =
     $\infty$ 
    distUsSitios(:, ocupados) =  $\infty$ 
    k = k + 1; if (nroUsCubiertos >= N) or (min(min(distUsSitios)) ==  $\infty$ ) endif
endwhile

Paso: 6 Return daps = ocupados;

```

Capítulo 4

Análisis de Resultados

En este capítulo se expone el análisis de resultados de acuerdo a la metodología y modelamiento presentados en el capítulo 3, teniendo como resultado en la figura 4.1 la teselación de la heurística aplicada con los algoritmos de Voronoi y Delaunay, muestra como resultado que se a logrado dividir el problema en 11 segmentos, de tal forma que a cada segmento se aplicará el dimensionamiento 3.1, tomando en cuenta las capacidades especificadas en 2.6, además que para cada capacidad se evaluarán los 10 distintos radios de cobertura de acuerdo con el algoritmo 1 1, es de aquí que se aplicaran los técnicas de optimización a cada segmento teniendo los resultados mostrados en la sección 4.1.

4.1. Optimización de DAPs por sectores Teselados

A continuación se presentan los resultados del modelo de optimización para cada segmento resultado de la teselación realizada como método para relajar el problema en la zona de estudio, teniendo entonces que en la figura 4.2 se muestran los resultados para el segmento 1, obteniendo resultados de optimización de los dos modelos empleados, sin embargo para el modelo resuelto por MILP mediante LPS, se observa que para el radio de cobertura de 1.2 km con capacidad de 30 usuarios por DAP no existe una solución que haya convergido, esto debido a la complejidad computacional, a más también se evidencia que en este modelo existe un concentrador menos para cada cobertura evaluada a diferencia del modelo de optimización basado

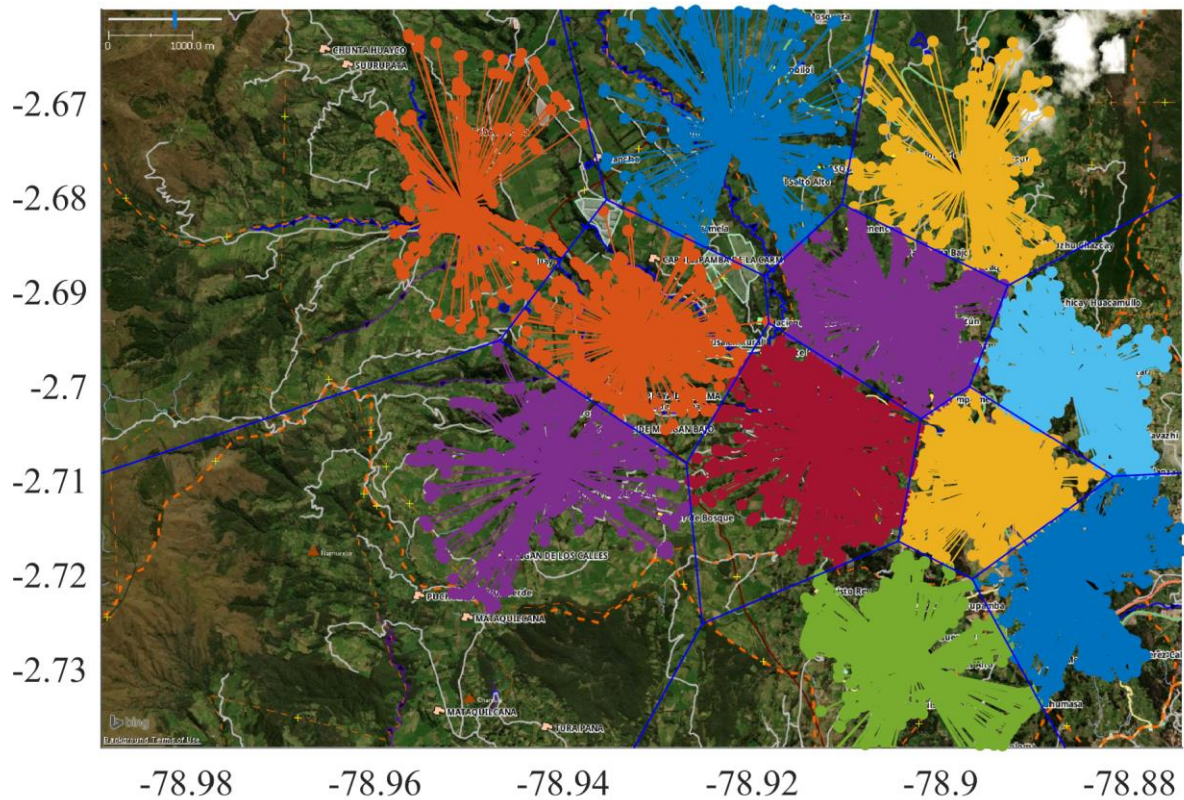


Figura 4.1: Teselación obtenida de la heurística basada en Voronoi y Delaunay

en Greedy, esto debido a que en este último no considera una distribución homogénea de los nodos hacia el concentrador, en cuando LPS si lo hace, también se observa que una vez superado los radios de cobertura de 2 kilómetros ambos modelos han evaluado una misma capacidad de concentradores esto indica que para las áreas de cada segmento van a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP.

En la figura 4.3 se observa que la complejidad computacional para los radios de cobertura de 400 a 1200 metros para capacidades de 30 usuarios por DAP es demasiado elevada sin obtener un resultado después de 4 días de trabajo computacional, así como para radios de cobertura de 800 a 1200 metros para capacidades de 72 usuarios por DAP, a más de esto se puede comparar que los resultados si obtenidos por LPS para el resto de capacidades y radios de cobertura a partir de los 2 km coinciden en la misma cantidad de concentradores, en cuanto a los radios menores a estas distancias para capacidad de 72 usuarios el algoritmo basado en Greedy, devuelve una cantidad de

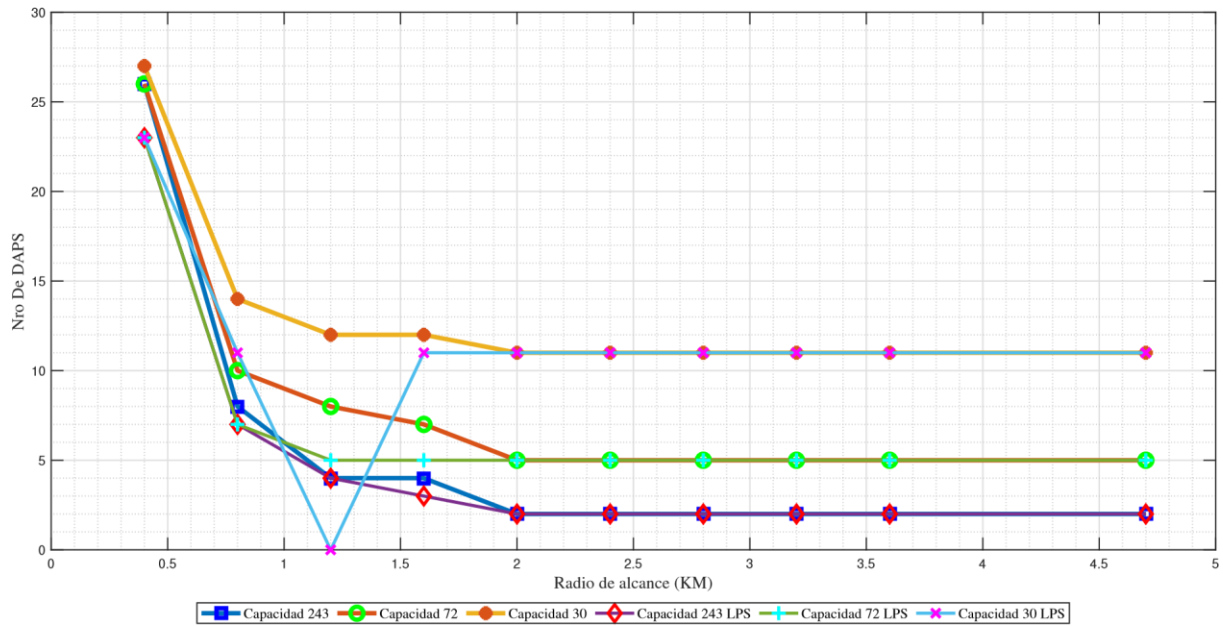


Figura 4.2: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 1 para cada capacidad

6 concentradores más que el algoritmo resuelto por LPS, aquí se evidencia como este ultimo considera una repartición homogénea de usuarios por cada DAP, en cuanto a la capacidad de 243 esta diferencia es de 4 concentradores.

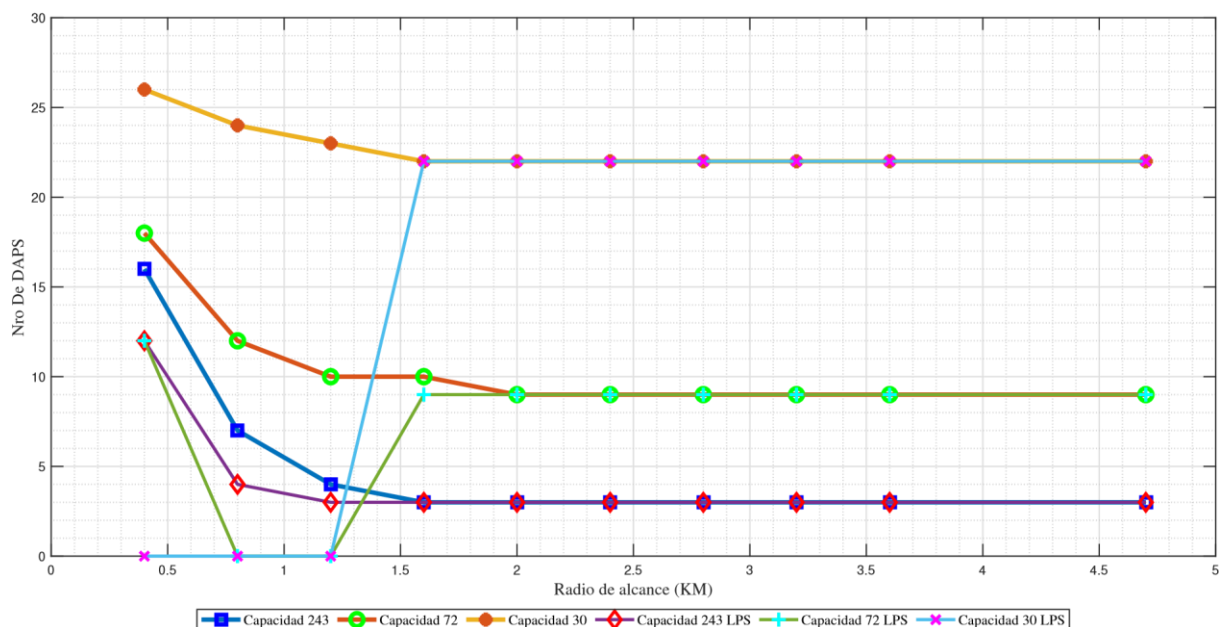


Figura 4.3: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 2 para cada capacidad

En la figura 4.4 debido a la complejidad computacional del segmento, siendo

este uno de los que presenta mayor densidad poblacional LPS no ha resuelto ningún escenario, obteniendo así resultados únicos del algoritmo basado en Greedy, de aquí se observa que para capacidades de 30 usuarios al superar los radios de cobertura de 800 metros se necesitaran 38 DAPs para cubrir la zona, sin embargo para el radio de cobertura de 400 metros se necesitan 35 DAP, esto se da debido a que el algoritmo no considera una distribución homogénea para cada concentrador sino que elige completar la capacidad de acuerdo al radio de cobertura correspondiente, para las dos capacidades restantes se muestra que después de los 2 Km esto indica que para el área de cada segmento van a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP.

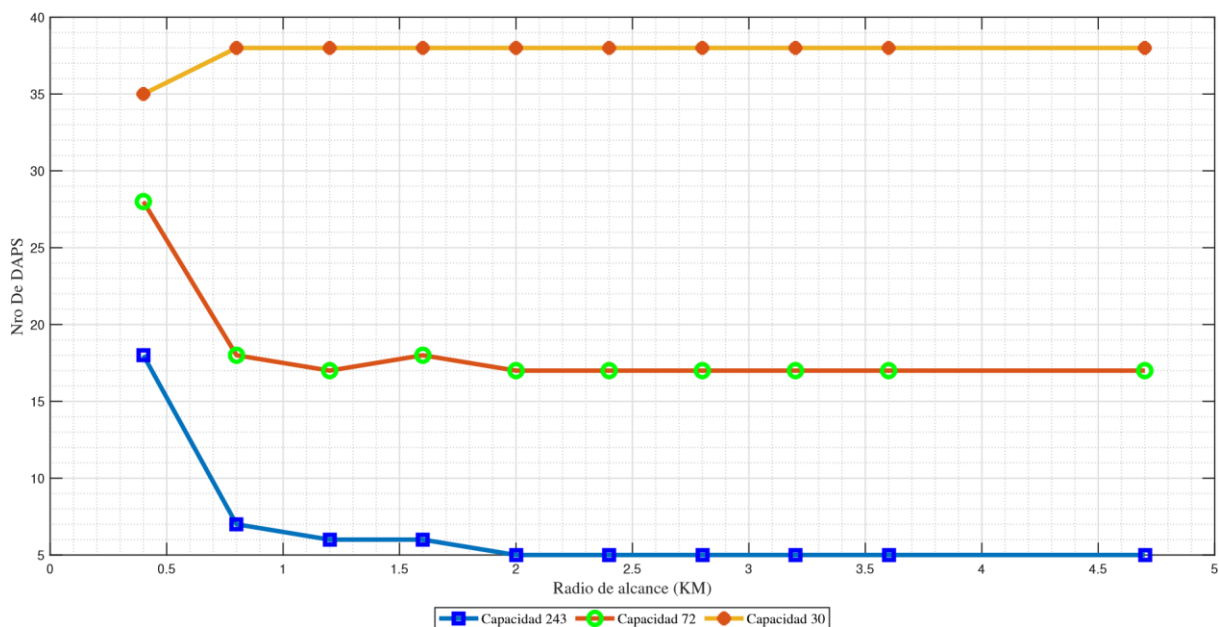


Figura 4.4: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 3 para cada capacidad

En la figura 4.5 se muestran los resultados de la aplicación de ambos algoritmos que fueron evaluados, sin embargo LPS no ha alcanzado a dar una respuesta para capacidades de 30 usuarios por DAP en radio de cobertura de 800 metros; de aquí se observa que el algoritmo basado en Greedy devuelve 2 concentradores más que LPS para capacidades de 243 usuarios por DAP, esto debido a la forma de trabajo de cada uno, así como para capacidades de 72 usuarios la diferencia es de 2 DAPs, en cuanto a capacidades de 30 usuarios la diferencia es disminuye de 4 a 1 DAP para radios de cobertura entre 1200 metros a 2400 metros.

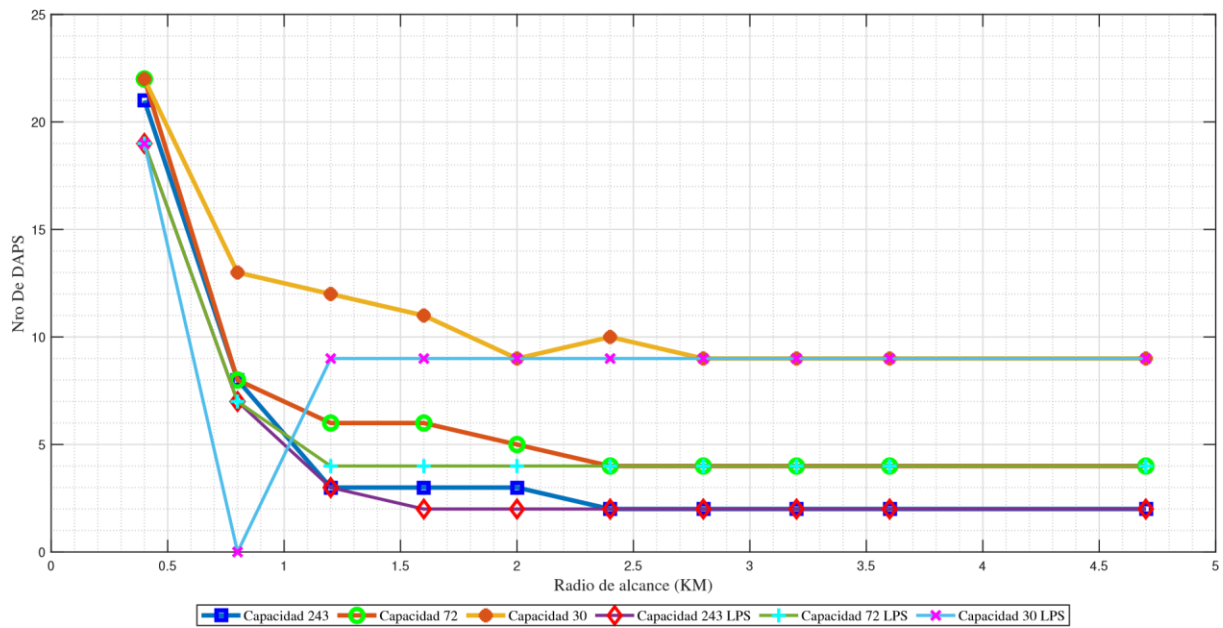


Figura 4.5: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 4 para cada capacidad

En la figura 4.6 LPS no muestra resultados para capacidades de 30 usuarios por DAP para radios de cobertura de 800 a 1200 metros, de aquí se observa que la diferencia entre cantidad de concentradores es de 4 para capacidades de 243 usuarios por DAP en radio de cobertura de 400 metros, sin embargo para radios de 800 metros ambos algoritmos encuentran la misma cantidad de concentradores, en cuanto a las capacidades de 72 usuarios la diferencia es de 3 para radios de cobertura de 400 metros y de 2 para radios de cobertura de 800 a 1600 metros, en cuanto a capacidades de 30 usuarios por DAP la diferencia es de 5 en radios de 400 metros, sin embargo a partir de los 2.4 Km ambos algoritmos coinciden en cuanto a las cantidades de DAP para cada radio de cobertura, esto también indica que para el áreas de este segmento van a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP.

En la figura 4.7 debido a la complejidad computacional del segmento, siendo este uno con mayor densidad poblacional LPS no ha resuelto ningún escenario, obteniendo así resultados únicos del algoritmo basado en Greedy, de aquí se observa que para capacidades de 30 usuarios al superar los radios de cobertura de 1200 metros

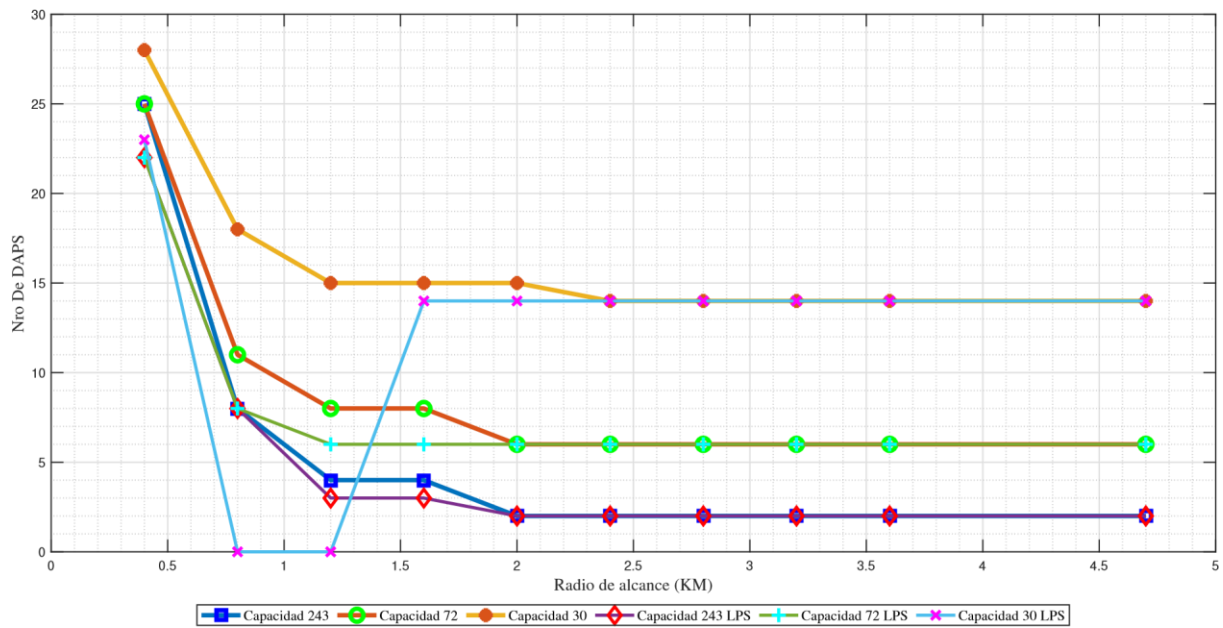


Figura 4.6: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 5 para cada capacidad

se necesitaran 38 DAPs para cubrir la zona, sin embargo para el radio de cobertura menores se necesitan 35 DAP, esto se da debido a la forma de trabajo del algoritmo, así tambien se observa que para las dos capacidades de 243 y 72 después de superar radios de cobertura de 1600 metros existen las mismas cantidades de DAP correspondientes a cada capacidad, esto también indica que para el áreas de este segmento van a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP.

En la figura 4.8 LPS no muestra resultados para la capacidad de 30 usuarios por DAP para radios de cobertura menores a 2000 metros, y también para capacidades de 72 usuarios en radios de cobertura de 800 a 1600 metros, entonces se observa que para los resultados obtenidos en radios superiores a 2 Km ambos algoritmos evalúan una misma cantidad de DAPs, esto también indica que para el áreas de este segmento van a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP; en cuanto a la diferencia en la cantidad de DAPs entre LPS y el algoritmo basado en Greedy se muestra que para capacidades de 72 usuarios es de 2 unidades para radios de cobertura de 400 metros y para capacidades de 243 usuarios por DAP es de 1 en radios de 400 a 800 metros.

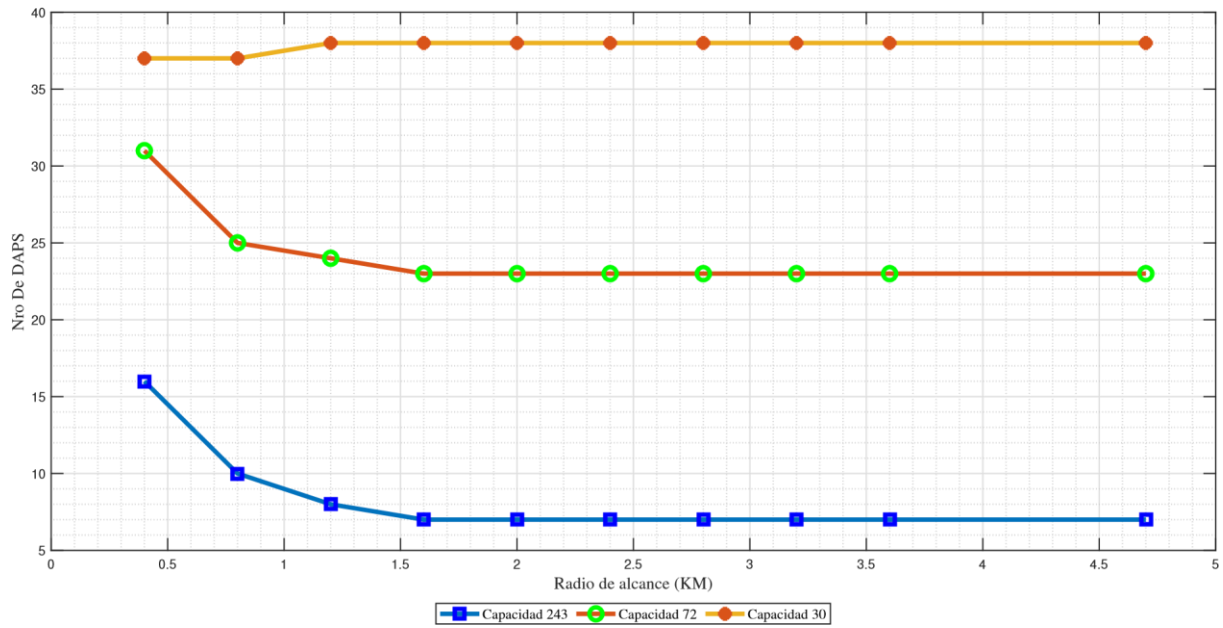


Figura 4.7: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 6 para cada capacidad

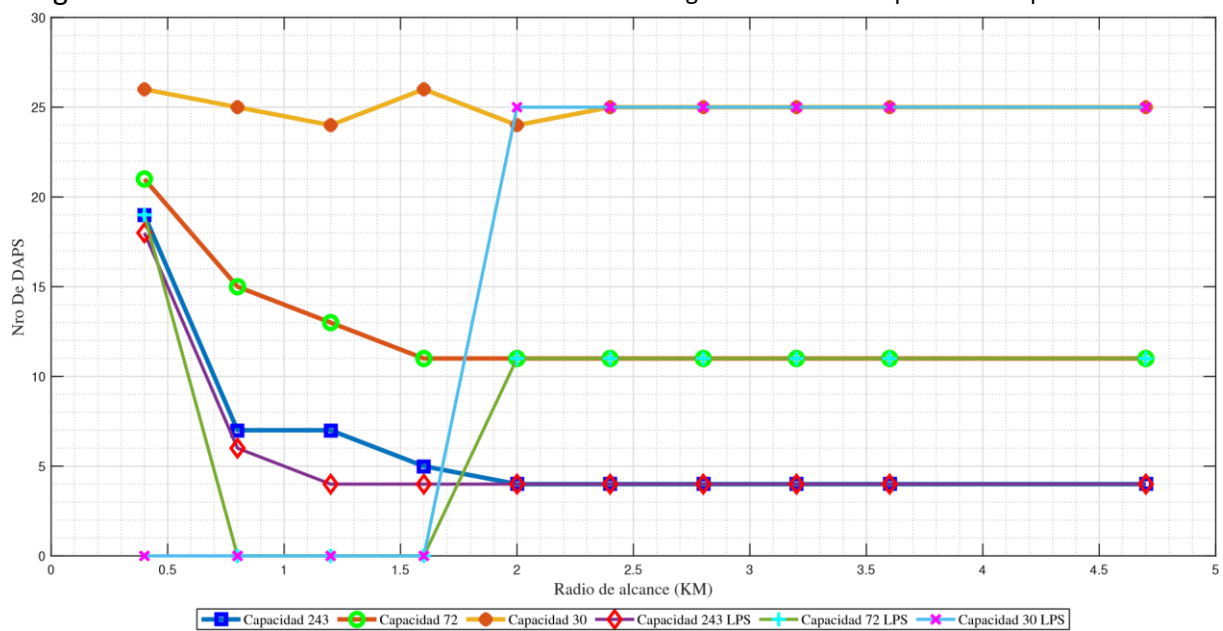


Figura 4.8: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 7 para cada capacidad

En la figura 4.9 que corresponde al segmento 8 de la teselación LPS no muestra resultados para capacidades de 30 usuarios en ningún radio de cobertura, de aquí que para este segmento en estas capacidades solo se consideran los resultados mostrados por el algoritmo basado en Greedy, en cuanto a las capacidades de 243 y 72 ambos algoritmos encuentran la misma cantidad de DAP para el segmento a partir de los radios de cobertura

superiores a 1600 metros, esto también indica que va a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP; en cuanto a radios menores a 1600 metros para capacidades de 243 usuario LPS muestra que se necesitan 2 concentradores menos, que lo resuelto por el algoritmo basado en Greedy, para capacidades 72 usuarios la diferencia es de 3 unidades para un radio de 800 metros y de 6 unidades para radios de 400 metros.

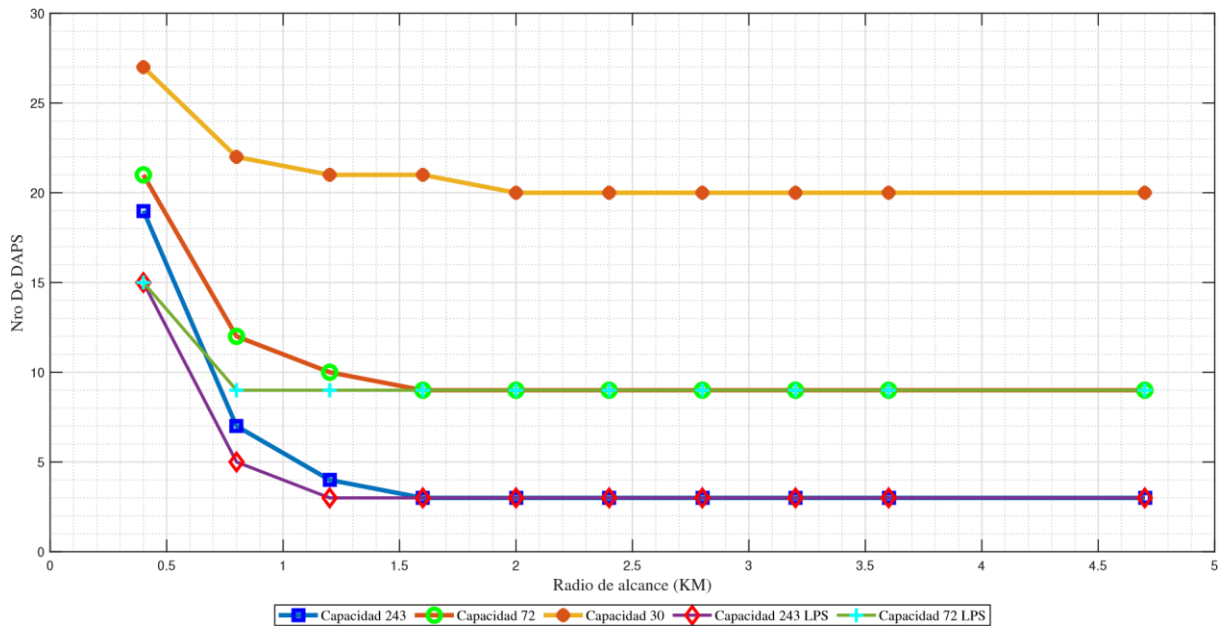


Figura 4.9: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 8 para cada capacidad

En la figura 4.10 no se muestran resultados por parte del algoritmo resuelto en LPS para capacidades de 243 y 30 usuarios por DAPP en radios menores a 1600 metros, lo que nos lleva a tomar en cuenta para estas distancias únicamente los resultados obtenidos por el algoritmo basado en Greedy, en cuanto para radios superiores a este ambos algoritmos encuentran como resultado la misma cantidad de concentradores de acuerdo a cada capacidad, esto también indica que va a existir mas de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP, para capacidades de 72 usuarios LPS muestra que para radios de 800 metros se necesitan 2 concentradores menos que lo resuelto por el algoritmo basado en Greedy;

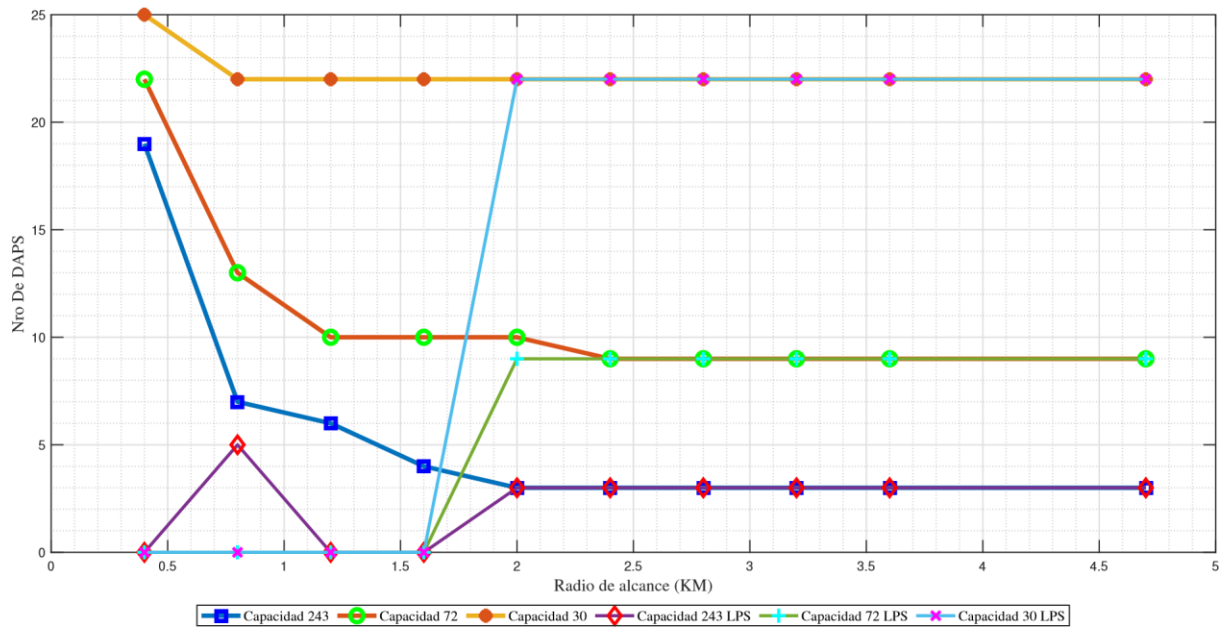


Figura 4.10: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 9 para cada capacidad

En la figura 4.11 y la figura 4.12 LPS no muestra resultados para ninguna capacidad debido a la complejidad computacional que presenta el problema en los segmentos 10 y 11 de la teselación, en ambas figuras se muestra que a partir de radios superiores a 2 Km, para las tres capacidades existirán en correspondencia a cada una igual número de concentradores, lo que indica que va a existir más de un concentrador cubriendo la misma área pero atendiendo las capacidades que corresponde a cada DAP.

Al analizar las gráficas se puede identificar que radio de cobertura es más conveniente seleccionar para cada segmento, de acuerdo a la capacidad que se elija tomando en cuenta que las capacidades evaluadas corresponden a una velocidad de transmisión distinta como se especifica en 2.6, de aquí que se identifica conveniente que para capacidades de 30 usuarios por DAP no se tomen a consideración radios mayores a 800 metros, para capacidades de 72 usuarios por DAP se usen radios de cobertura menores a 1,2 km, y para capacidades de 243 usuarios por DAP no sobrepasar radios de cobertura de 1.6 km, todo esto debido a que se observa que para cada capacidad después del radio de cobertura indicado, un DAP sobrepasa la zona a cubrir, siendo más susceptible a interferencias ya que más de un DAP cubre la misma área.

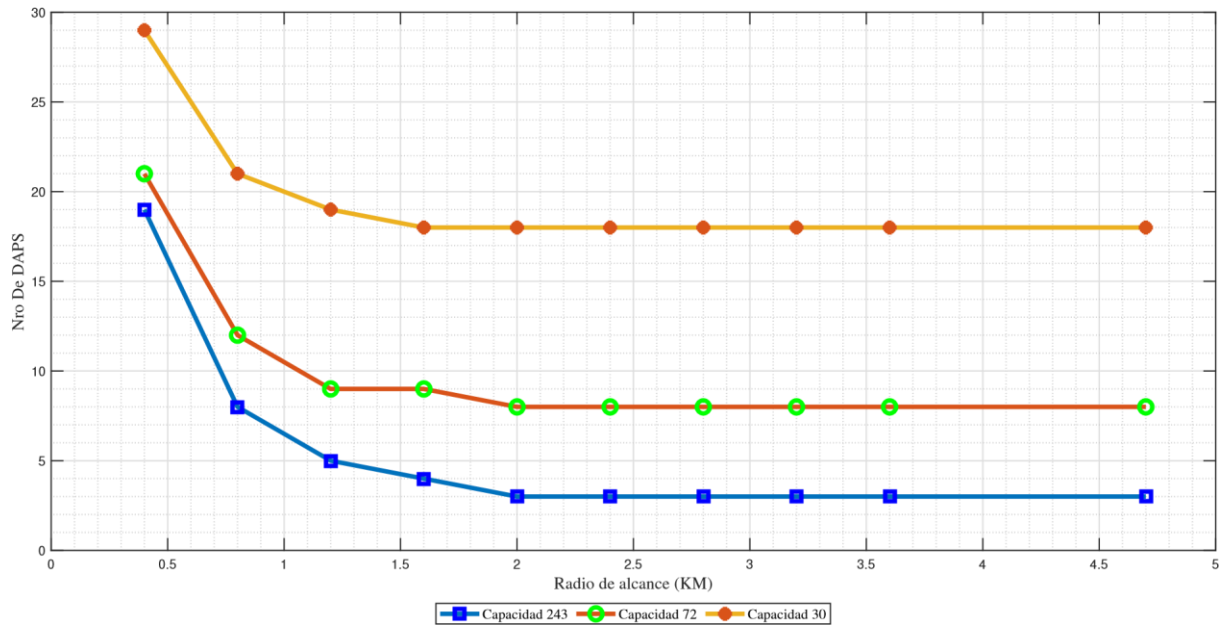


Figura 4.11: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 10 para cada capacidad

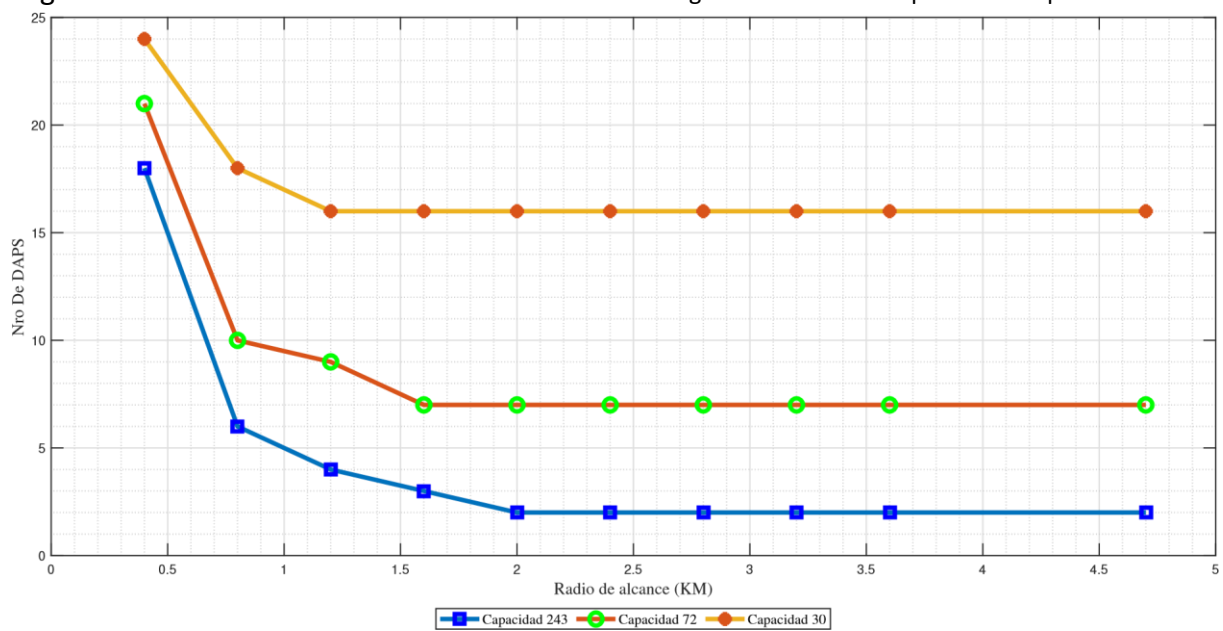


Figura 4.12: Radios de cobertura vs concentradores en el segmento teselado 11 para cada capacidad

Entonces para el caso de estudio se ha considerado viable usar una capacidad de 243 usuarios que corresponde a velocidades de transmisión de 5kbps, eligiendo un radio de cobertura de 800 metros conveniente debido a la zona geográfica de Biblián es bastante montañosa y también debido a su densidad poblacional esto para evitar interferencias en los canales de Downlink por exceso de usuarios en líneas de vista entre los nodos y los DAP, de

esta forma se tiene que para los segmentos evaluados se tendrá las capacidades y radios de cobertura de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4.1 a mas también se tomará en cuenta el algoritmo que devuelva menor cantidad de concentradores para los radios de cobertura seleccionados con el fin de brindar una idea para la aplicación del estudio con menor coste de instalación.

Entonces, al obtener la optimización para cada segmento, las figuras a continuación muestran la ubicación de los concentradores para cada segmento indicado en la tabla 4.1, como ultimo la figura 4.24 muestra una visión general del área optimizada.

Tabla 4.1: Capacidades de acuerdo a las velocidades de transmisión

Nro Segmento	Capacidad	Radio de cobertura	Nro de DAPs	Algoritmo
1	243	800 m	7	LPS
2	243	800 m	4	LPS
3	243	800 m	7	Greedy
4	243	1200 m	3	LPS
5	243	800 m	8	LPS/Greedy
6	243	800 m	10	Greedy
7	243	800 m	6	LPS
8	243	800 m	5	LPS
9	243	800 m	5	LPS
10	243	800 m	8	Greedy
11	243	800 m	6	Greedy

La figura 4.13 muestra los resultados obtenidos para el segmento 1 en donde la optimización ha logrado reducir desde 42 posibles sitios candidatos para DAPs a tan solo 7, también se muestra que gracias a establecer un porcentaje de cobertura el segmento tiene a todos los nodos atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, así se garantiza el trabajo óptimo para AMI en este segmento.

La figura 4.14 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 2 con tan solo 4 DAPs, esto gracias a establecer una restricción de cobertura y capacidad que permiten establecer un porcentaje de cobertura total para el segmento, mostrando como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI en este segmento.

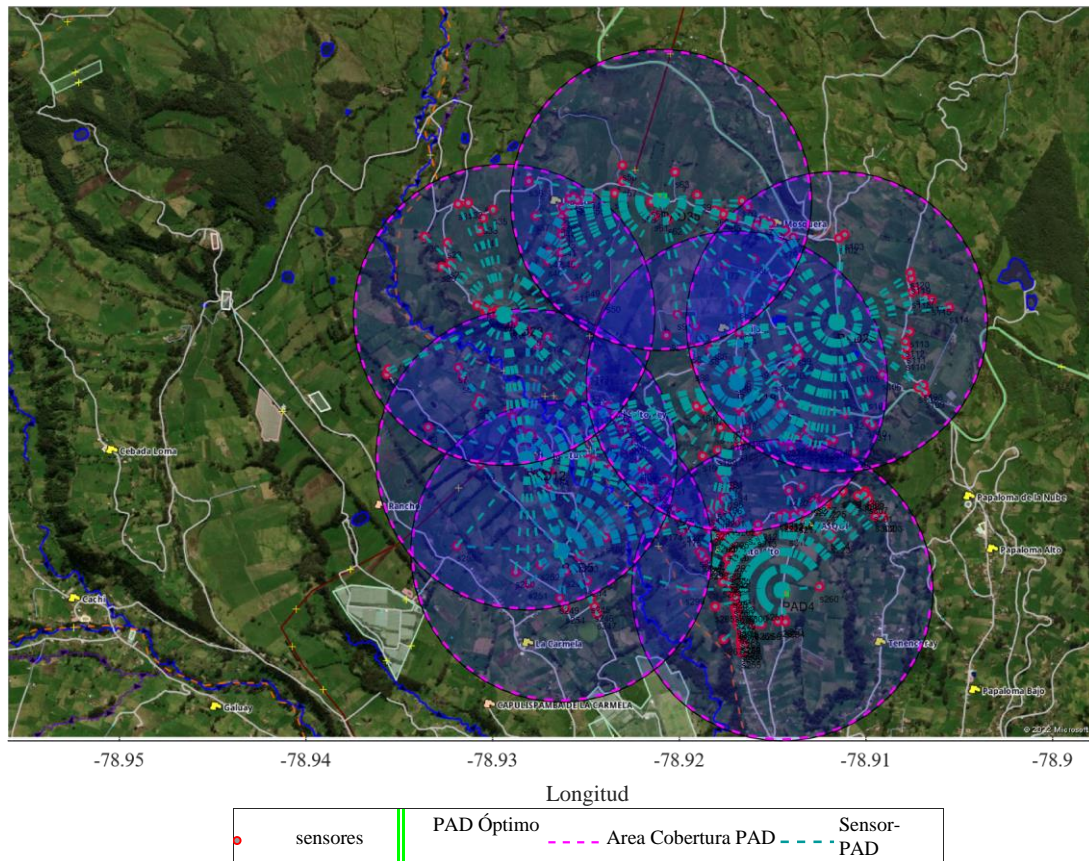


Figura 4.13: Concentradores usados para el Segmento 1

La figura 4.15 muestra los resultados del modelo de optimización que a logrado reducir de 38 posibles sitios candidatos a tan solo 7 DAPs que alcanzan a satisfacer los requerimientos para el segmento 3, también se muestra como al ser uno de los segmentos con mayor densidad poblacional no es necesario saturar la zona con gran cantidad de concentradores, también se muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI en zonas suburbanas.

La figura 4.16 muestra los resultados obtenidos para el segmento 4 en donde la optimización a logrado cubrir la zona con tan solo 3 DAPs, también se muestra que gracias a establecer un porcentaje de cobertura el segmento tiene a todos los nodos atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, entonces, de esta manera se garantiza el trabajo óptimo para AMI en este segmento, también se muestra que debido a que esta zona presenta la densidad poblacional más baja con una distribución

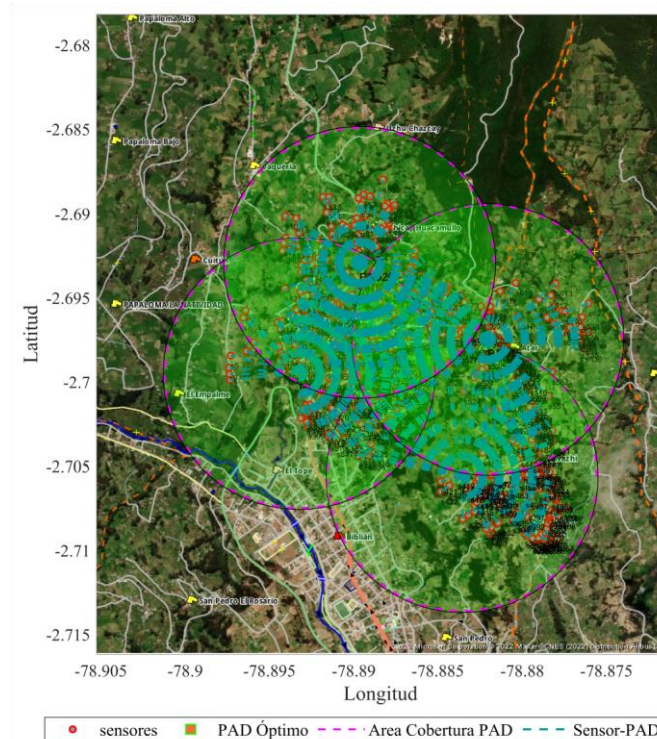


Figura 4.14: Concentradores usados para el Segmento 2

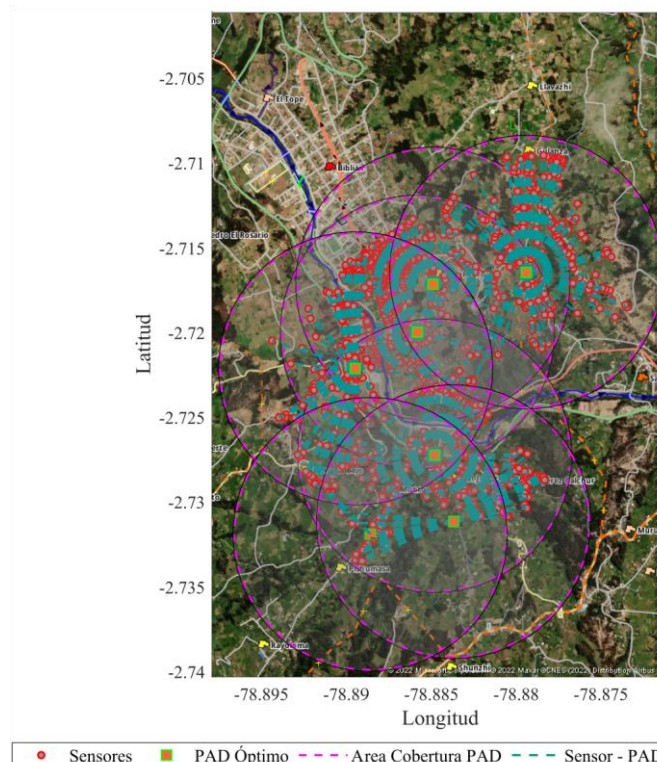


Figura 4.15: Concentradores usados para el Segmento 3 de usuarios bastante dispersa se visto necesario utilizar un radio de cobertura de 1200 metros mayor al de los demás segmentos.

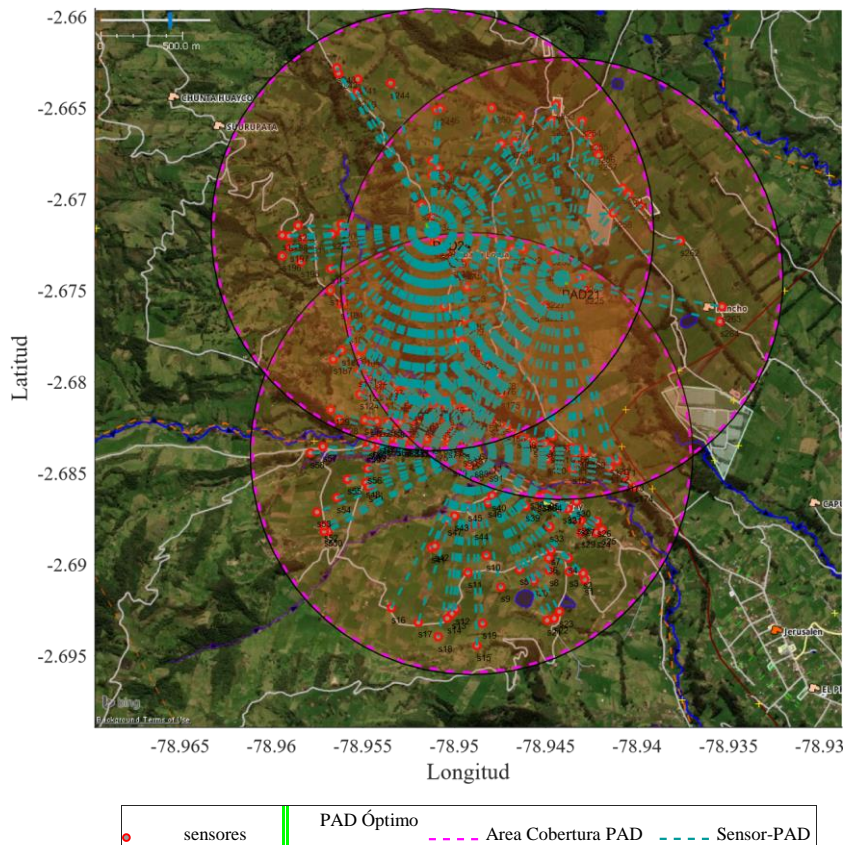


Figura 4.16: Concentradores usados para el Segmento 4

La figura 4.17 muestra como el modelo de optimización a logrado reducir de 33 posibles sitios candidatos a tan solo 8 DAPs que alcanzan a satisfacer los requerimientos para el segmento 5, esto gracias a establecer una restricción de cobertura y capacidad que permiten establecer un porcentaje de cobertura total para el segmento, así se muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs que se ubican en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI en este segmento.

La figura 4.18 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 6 con 10 DAPs, esto debido a las restricciones de cobertura y capacidad que considera el modelo llevando a a tener un porcentaje de cobertura total para el segmento, mostrando como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la

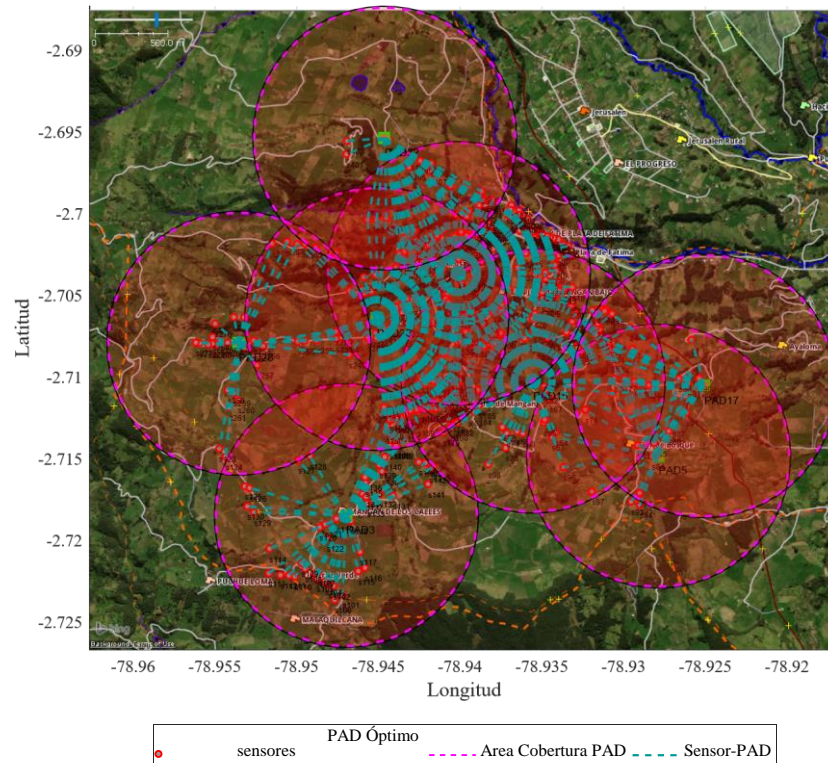


Figura 4.17: Concentradores usados para el Segmento 5

comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI en este segmento en una de las zonas con mayor densidad poblacional.

La figura 4.19 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 7 con tan solo 6 DAPs, esto gracias a establecer una restricción de cobertura y capacidad que consideran un porcentaje de cobertura total para el segmento, mostrando como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación con la garantía de tener un funcionamiento óptimo para AMI en este segmento.

La figura 4.20 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 8 teniendo 5 DAPs con radios de cobertura de 800 metros para cada uno, esto gracias a las restricciones de cobertura y capacidad que dan forma al modelo permitiendo tener un porcentaje de cobertura total para el segmento, entonces se muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs que se han ubicado en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación con la garantía de tener un funcionamiento óptimo para AMI en este segmento, haciendo que un posible despliegue tenga mayor complejidad en la instalación de los nodos

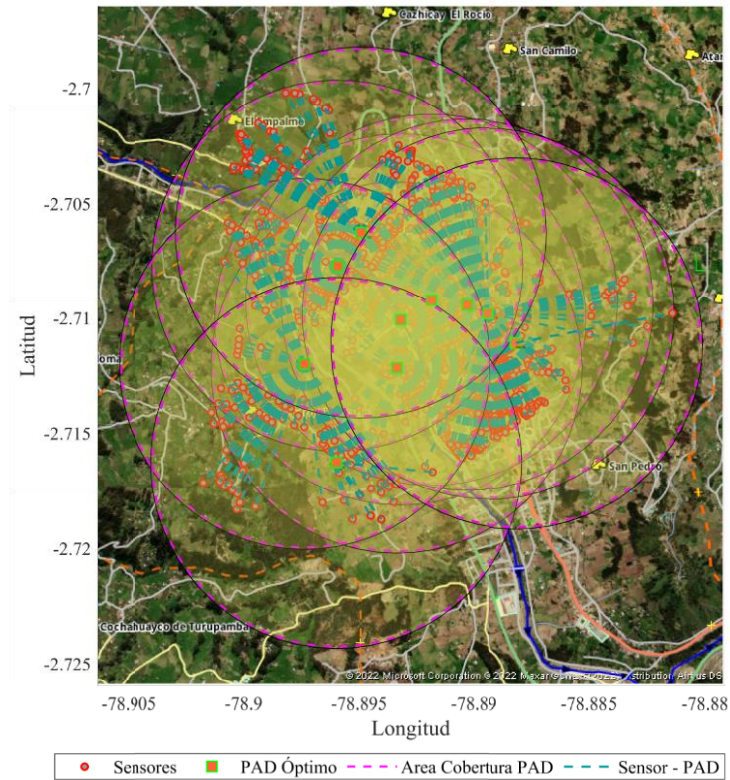


Figura 4.18: Concentradores usados para el Segmento 6

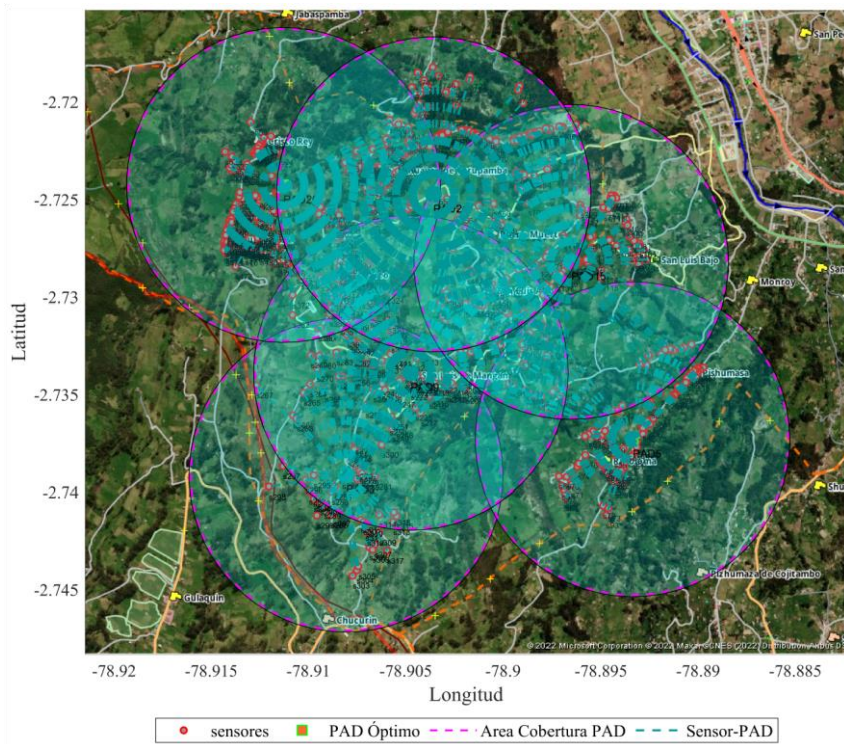


Figura 4.19: Concentradores usados para el Segmento 7 antes que en los concentradores.

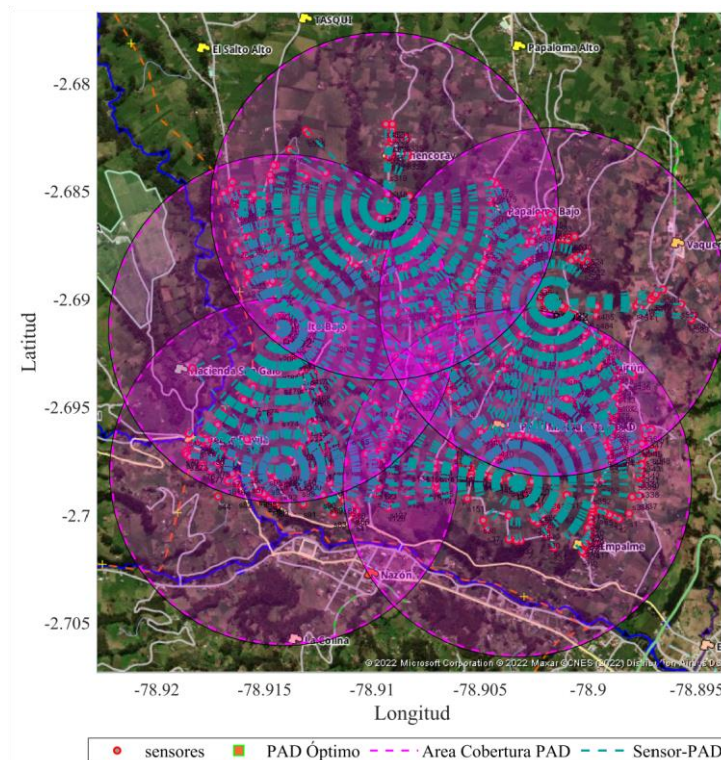


Figura 4.20: Concentradores usados para el Segmento 8

La figura 4.21 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 9 con tan solo 5 DAPs, gracias a las consideraciones del modelo en cuanto restringir cobertura y capacidad de cada DAP lo que permite tener un porcentaje de cobertura total para el segmento, de esta manera se muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, lo que resulta en la reducción de los costes en la comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI.

La figura 4.22 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 10 con 8 DAPs para radios de cobertura de 800 metros para cada uno mostrando que al ser a tercera zona con mayor densidad poblacional, las restricciones de cobertura y capacidad que dan forma al modelo han permitido obtener un porcentaje de cobertura total para el segmento, bajo esto se muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs que se han ubicado en la zona, esto conlleva a la garantía de tener un funcionamiento óptimo para AMI dentro de este segmento.

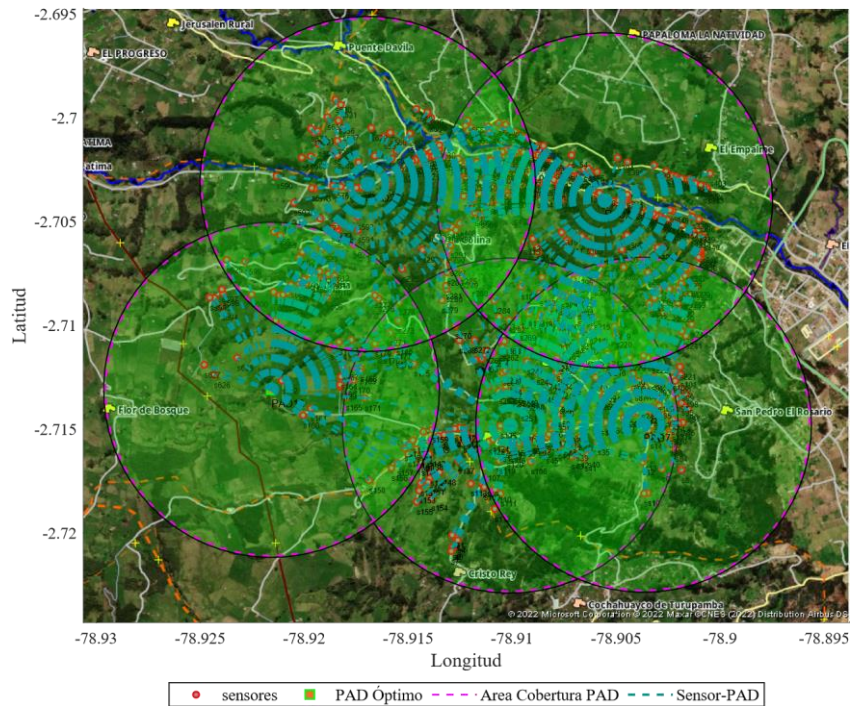


Figura 4.21: Concentradores usados para el Segmento 9

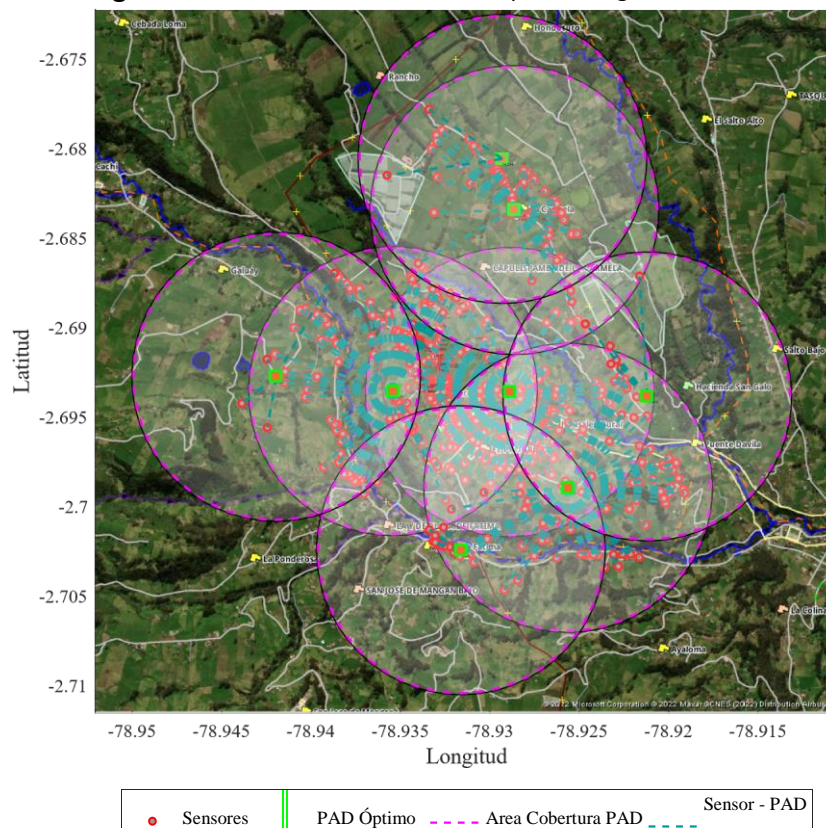


Figura 4.22: Concentradores usados para el Segmento 10

La figura 4.23 muestra como la optimización a logrado cubrir los requerimientos para el segmento 11 con tan solo 6 DAPs, esto gracias a establecer una restricción de cobertura y capacidad que permiten establecer un porcentaje de cobertura total para el segmento, así se

muestra como todos los nodos son atendidos por alguno de los DAPs ya ubicados en la zona, de esta manera se han reducido los costes en la comunicación sin perder de vista el funcionamiento óptimo para AMI en este segmento.

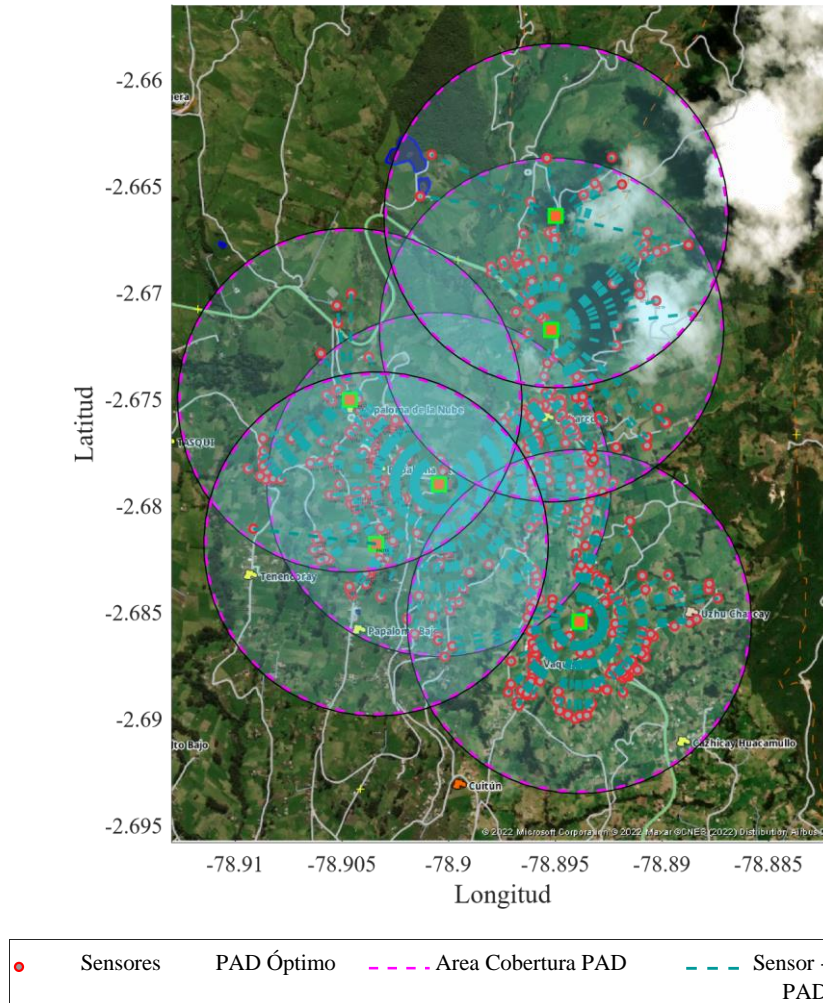


Figura 4.23: Concentradores usados para el Segmento 11

La figura 4.24 muestra un panorama general de toda la ciudad de Biblián con los resultados de la optimización de cada segmento especificados de acuerdo a los colores mostrados en las figuras individuales anteriores, teniendo de color azul el segmento 1, de verde los segmentos 2 y 9, de color plomo el segmento 3, el segmento 4 se muestra de color salmón, el segmento 5 se muestra pintado de color rojo, de amarillo se ha pintado el segmento 6, el segmento 7 se muestra de color turquesa, el segmento 8 es morado, el

4.2. PLANIFICACIÓN ANTE UN POSIBLE DESPLIEGUE

segmento 10 se indica con blanco, en cuanto al segmento 11 se identifica de celeste. También la figura muestra en donde se ubican los DAP resultado de los modelos de optimización para cada segmento, de esta manera también se indica que debido a las consideraciones de la tecnología propuesta en el estudio, el dimensionamiento no dice a quien se conecta cada sensor sino asegura que las características físicas de la tecnología de WSN se garanticen, entonces, la tecnología misma a través del protocolo LoRaWAN establece que si al menos dos gateway han escuchado la solicitud estos pasarán los datos al servidor, en donde gracias al protocolo se responderá a través de cualquiera de ellos.

4.2. Planificación ante un posible despliegue

Gracias a la teselación, la propuesta que el autor brinda en función de las características geográficas y de densidad poblacional además de tratarse de un escenario suburbano y rural se usa una estrategia de crecimiento por segmento, considerando la zona suburbana(urbana) de la ciudad, como prioridad para las primeras instalaciones y de ahí disminuyendo de acuerdo a los segmentos con menor densidad poblacional teniendo que el crecimiento será desde los segmentos 3 y 6 correspondientes a la zona suburbana, recomendando seguir por el segmento 10 correspondiente a la parroquia Jerusalén como tercero en densidad poblacional, después se podrán implementar el despliegue en los segmentos restantes considerando la relevancia en prioridades de medición para la Empresa eléctrica CentroSur.

4.2. PLANIFICACIÓN ANTE UN POSIBLE DESPLIEGUE

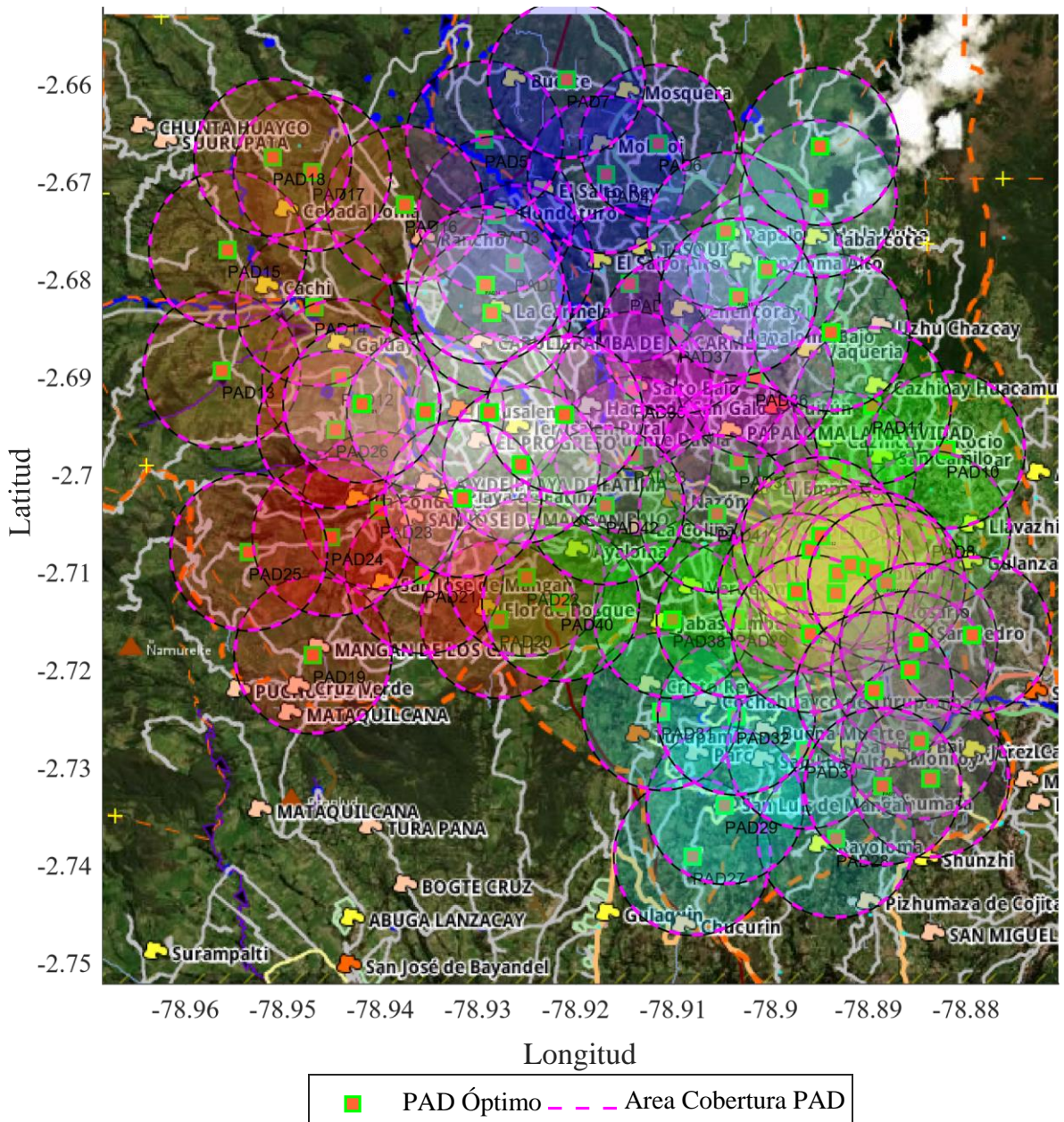


Figura 4.24: Modelo de optimización en toda la Zona de estudio

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

Conclusiones:

La tecnología **LoRaWAN** permite múltiples configuraciones en sus parámetros de comunicación lo que determina las tasas de transmisión, de esta manera como resultado de la evaluación de su rendimiento se ha identificado que mientras mas amplio es el radio de transmisión mayor es la latencia para velocidades de transmisión altas requeridas por **AMI**, esto hace que sea necesario establecer tiempos apropiados de medición y radios de cobertura no muy grandes, ya que debido a esto los canales de Downlink no suelen responder de manera apropiada, de esta manera también se a identificado que el funcionamiento en distintas frecuencias no afecta a la cantidad de usuarios que puede atender un gateway debido a que los canales que ofrece la tecnología son ajustables, es decir que para un óptimo funcionamiento un gateway debe atender como máximo 6 canales de subida y 3 de bajada.

Los algoritmos de optimización planteados permitieron resolver los problemas del posible despliegue de **DAP** para **AMI** en la ciudad de Biblián, primero dimensionando la red, esto es tener un problema por secciones, lo que permite minimizar la complejidad computacional, como también llega a reducir el numero de sitios candidatos debido a las restricciones impuestas en cuanto a cobertura y capacidad de usuarios que permite la tecnología, esto resulta en una reducción al costo asociado a infraestructura de red e implementación, de esta manera también se muestra que las heurísticas para resolver el problema de optimización, muestran soluciones cuasi-óptimas, ya que puede existir una que muestre un mejor resultado a

la evaluación de las restricciones en la comunicación.

Recomendaciones:

Cuando la tecnología no considera, ni resuelve problemas de interferencia como lo hace [LoRa](#), se recomienda usar restricciones en los modelos de dimensionamiento que consideren esta característica de la comunicación identificando un número K de canales que permita la tecnología considerar para el desarrollo de sus aplicaciones, también se recomienda que para evaluar un modelo de dimensionamiento se debe identificar el método más adecuado de resolución de acuerdo a las características de la zona de estudio esto con el fin de evitar que la complejidad computacional sea elevada, esto para que se considere usar heurísticas que permitan reducir estos costos computacionales.

Para el desarrollo de aplicaciones con tecnología [LoRa](#) se recomienda identificar de manera asertiva los requerimientos de la aplicación que se vaya a realizar, ya que de esta manera se pueden adecuar los parámetros de la tecnología según estos requerimientos, todo esto ya que [LoRa](#) permite múltiples configuraciones en cuanto a tasas de transmisión de datos, también es necesario identificar las frecuencias de operación de los equipos para identificar una de uso libre en la zona de aplicación ya que la tecnología opera en 3 distintas ventanas. Entonces se deben considerar entonces las características del BW del equipo que se llegue a implementar ya que eso puede significar una variación en la capacidad o en el radio de cobertura, viendo una dependencia en la respuesta tecnológica que se desee implementar en la aplicación.

Trabajos futuros:

Como planteamientos futuros se pretende realizar métodos de segmentación basados en la ubicación geográfica de las parroquias, de esta manera se pueden evaluar que tan eficientes son los métodos de segmentación usados, con este contexto se recomienda que para el uso de la tecnología [LoRa](#) se usen activaciones [OTAA](#), debido a que los canales se liberan con mayor rapidez, en cuanto a una activación [ABP](#) limita la comunicación al estar siempre el enlace activo.

Glosario

ABP activation by personalization – Activación por Personalización.

AMI Advanced metering infrastructure – Infraestructura de Medición Avanzada. Permite el transporte de datos bidireccional desde y hacia la Oficina Central.

AMR Automatic meter reading – Lectura automática de medidores. Permite el transporte de datos solamente hacia la Oficina Central..

BS Base station – Estación Base.

BW Bandwidth – Ancho de Banda.

CR Code rate – Tasa de codificación.

CSS Chirp Spread Spectrum – espectro ensanchado con chirps.

DAP Data agregation point – Punto de agregación de datos.

DER Distributed energy resources – Recursos energéticos distribuidos.

DSM Demand side management – Gestión del lado de la demanda.

FSK Frecuency shift keying – Modulación por desplazamiento de frecuencia.

HAN Home-Area Network – Red de Área de Hogar.

HPA High Power Amplifier – Amplificador de alta potencia.

IoT Internet of Things – Internet de las Cosas.

LoRa Long Range – largo alcance.

Glosario

LoRaWAN Long Range Wide Area Network – Red de área amplia de largo alcance.

LPWAN Low-Power Wide-Area Network – Red de área amplia de baja potencia.

MDMS Sistemas de Gestión de Datos de Medición.

MILP Mixed integer lineal programation – Programación entera lineal mixta.

NAN neighborhood area network – red de área de vecindaria.

OTAA over the air activation – Activación en el aire.

PAN Personal Area Network – Red de Área Personal.

PHY physical layer for OSI Model – Capa física del Modelo OSI.

SF Spreading Factor – Factor de Ensanchamiento.

SG Smart Grid – Red eléctrica inteligente .

SGIRM Smart Grid and Interoperability Reference Model – Red Eléctrica inteligente y modelo de referencia de interoperabilidad.

SM Smart Meter – Medidor inteligente.

SR Smart Reading – Lectura inteligente.

TIC Tecnologías de la información y Comunicación.

WAN Wide-Area Network – Red de Área Amplia.

WSN Wireless Sensor Network – Red de Sensores Inalámbricos.

Bibliografía

- [1] S. S. Refaat, O. Ellabban, S. Bayhan, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, and M. M. Begovic, *Smart Grid and Enabling Technologies (Wiley - IEEE)*. John Wiley & Sons, 2021.
- [2] N. S. Nafi, K. Ahmed, M. A. Gregory, and M. Datta, "A survey of smart grid architectures, applications, benefits and standardization," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 76, pp. 23–36, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.003>
- [3] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, "The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges," *Computer Communications*, vol. 36, no. 17-18, pp. 1665–1697, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2013.09.004>
- [4] C. Ganán, E. Inga, and R. Hincapié, "Óptimo despliegue y enrutamiento de UDAP para infraestructura de medición avanzada basada en el algoritmo MST," *Ingeniare*, vol. 25, no. 1, pp. 106–115, 2017.
- [5] R. Wenner, "LoRa CHIRP - YouTube." [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dxYY097QNs0>
- [6] L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range iot technologies: The dawn of lora™," in *Future access enablers of ubiquitous and intelligent infrastructures*. Springer, 2015, pp. 51–58.
- [7] LoRa Alliance Technical Committee, "LoRaWAN 1.1 Specification," *LoRaWAN*, no. 1.1, p. 101, 2017. [Online]. Available: <https://loro-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>
- [8] Vikash, L. Mishra, and S. Varma, "Performance evaluation of real-time stream processing systems for Internet of Things applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 113, pp. 207–217, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.07.012>

- [9] U. Sendler, *The internet of things: Industrie 4.0 unleashed*. Springer, 2017.
- [10] M. Sonthalia, A. Jha, U. Gupta, and J. Thyagarajan, "A real time implementation of hierarchical routing protocol for IoT based wireless sensor network," *2019 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2019*, pp. 512–516, 2019.
- [11] S. Cui, Q. Yu, G. Gu, and Q. Gang, "Research on the architecture of electric power information communication network for smart grid," *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2017 - Proceedings*, vol. 2018-Janua, pp. 1–4, 2017.
- [12] D. Sabolic, "Influence of the transmission medium quality on the automatic meter reading system capacity," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 725–728, 2003.
- [13] S. Silva, "Deployment of LoRAWAN Network for Rural Smart Grid in Brazil," pp. 1–5, 2018.
- [14] P. E. Avila Campos, "Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales," p. 129, 2017. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28504>
- [15] Y. Oukessou, M. Baslam, and M. Oukessou, "LPWANIEEE 802.11ah and LoRaWAN capacity simulation analysis comparison using NS-3," *Proceedings of the 2018 International Conference on Optimization and Applications, ICOA 2018*, pp. 1–4, 2018.
- [16] P. Neumann, J. Montavont, and T. Noel, "Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study," *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2016.
- [17] D. Pérez, E. Inga, and R. Hincapié, "Optimal sizing of a network for smart metering," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 5, pp. 2114–2119, 2016.
- [18] CONELEC, M. C. de Sectores Estratégicos, and M. de Electricidad y Energía Renovable, "Plan maestro de electrificación 2013–2022: Vol4 aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental," 2013.

- [19] E. E. America, "Cómo la medición inteligente puede aportar a los servicios públicos," Chile, 2018. [Online]. Available: <https://www.eleconomistaamerica.cl/telecomunicacion-tecnologia-cl/noticias/9332075/08/18/Como-la-medicion-inteligente-puede-aportar-a-los-servicios-publicos.html>
- [20] E. Universo, "Con estudio, se sabrá nivel de ciudades inteligentes en Ecuador," 2020. [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/02/05/nota/7725012/estudio-se-sabra-nivel-ciudades-inteligentes-ecuador/>
- [21] E. Inga-Ortega, "Redes de Comunicación en Smart Grid," *Ingenius*, vol. 7, no. Revista de Ciencia y Tecnología, pp. 36–55, 2012.
- [22] E. Inga-Ortega, D. Arias-Cazco, V. Orejuela-Luna, and J. Inga-Ortega, "Comunicaciones celulares para medición inteligente de energía eléctrica en sistemas de distribución," *Ingenius*, vol. 10, 12 2013.
- [23] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, "Optimal deployment of cellular networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2014 - Conference Proceedings*, 2014.
- [24] J. Inga, E. Inga, C. Gómez, and R. Hincapié, "Evaluación de la infraestructura de medición y la respuesta de la demanda," *Revista Técnica Energía*, vol. 12, pp. 262–269, 2016.
- [25] J. Inga, E. Inga, A. Ortega, R. Hincapié, and C. Gómez, "Optimal Planning for Deployment of FiWi Networks based on Hybrid Heuristic Process," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 9, pp. 1684–1690, 2017.
- [26] M. Ruiz, P. Masache, and E. Inga, "Optimal communications for smart measurement of electric energy reusing cellular networks," vol. 2018-December. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 12 2018, pp. 198–204.
- [27] E. Inga, M. Campaña, R. Hincapié, and S. Céspedes, "Optimal placement of data aggregation points for smart metering using wireless heterogeneous networks." *IEEE*, 2018, pp. 1–6.
- [28] C. Suárez and E. Inga, "Optimal performance and modeling of wireless technology enabling smart electric metering systems including microgrids," *Sensors*, vol. 21, 11 2021.

- [29] E. Inga, J. Inga, and A. Ortega, "Novel approach sizing and routing of wireless sensor networks for applications in smart cities," *Sensors*, vol. 21, 7 2021.
- [30] EERCSSA, "Geovisor público," 2022. [Online]. Available: <https://geoportal2.centrosur.gob.ec/geoportal/apps/webappviewer/index.html?id=72a7304acd7a4df78866e70d8efc7c80>
- [31] P. Bansal and A. Singh, "Smart metering in smart grid framework: A review," in *2016 Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. IEEE, 2016, pp. 174–176.
- [32] Office of Energy Analysis, "International Energy Outlook with projections to 2050," *U.S. Energy Information Administration*, pp. 1–169, 2019. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
- [33] L. S. Communication, "The smart grid: An introduction," *The Smart Grid and Electric Power Transmission*, pp. 1–45, 2011.
- [34] E. Inga and J. Inga, "Wireless communications and virtual operator for residential electric metering," *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)*, 2014.
- [35] A. Sendin, J. Matanza, and R. Ferrus, *Smart Grid Telecommunications Fundamentals and Technologies in the 5G Era*.
- [36] S. K. Samanta and C. K. Chanda, "Wireless power network design through smart grid transmission system model," *2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE 2015*, pp. 2–6, 2016.
- [37] M. Burunkaya and T. Pars, "A smart meter design and implementation using ZigBee based Wireless Sensor Network in Smart Grid," *2017 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2017*, pp. 158–162, 2017.
- [38] E. D. Knapp and R. Samani, *Applied Cyber Security and the Smart Grid: Implementing Security Controls into the Modern Power Infrastructure*, 2013.

- [39] A. Mahmood, M. Aamir, and M. I. Anis, "Design and implementation of AMR smart grid system," *2008 IEEE Electrical Power and Energy Conference - Energy Innovation*, pp. 1–6, 2008.
- [40] T. Khalifa, K. Naik, and A. Nayak, "A survey of communication protocols for automatic meter reading applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 13, no. 2, pp. 168–182, 2011.
- [41] A. Gopstein, C. Nguyen, C. O'Fallon, N. Hastings, and D. Wollman, "DRAFT NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 4.0," p. 212, 2020. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/system/files/documents/2020/07/24/SmartGridDraftFramework.pdf>
- [42] IEEE Std 2030-2011, *IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads*, 2011, no. September. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6018237>
- [43] P. Urgilés, J. Inga-Ortega, A. Peralta, and A. Ortega, "Prediction of electricity consumption profiles using potential polynomials of degree one and artificial neural networks in smart metering infrastructure," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 30, 6 2021.
- [44] A. Ghasempour, "Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges," *Inventions*, vol. 4, no. 1, 2019.
- [45] E. M. I. Ortega, "PLANEACIÓN ÓPTIMA PARA DESPLIEGUE DE REDES INALÁMBRICAS HETEROGÉNEAS EN LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA REQUERIDA POR SMART GRID," Ph.D. dissertation, 2017.
- [46] Z. Rafique, H. M. Khalid, and S. M. Muyeen, "Communication Systems in Distributed Generation: A Bibliographical Review and Frameworks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207 226–207 239, 2020.
- [47] H. ANNA, "Wireless Sensor Network Designs," vol. 53, 2013.

- [48] A. Sharma, P. K. Singh, and Y. Kumar, "An integrated fire detection system using IoT and image processing technique for smart cities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, p. 102332, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102332>
- [49] P. Nayak and C. P. Reddy, "Bio-inspired routing protocol for wireless sensor network to minimise the energy consumption," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 214–220, 2020.
- [50] L.-M.-U. M. Technische Universität München, *book -Wireless Sensor Network Designs*, 2018. [51] S. Mosin, "A Model of LoRaWAN Communication in Class A for Design Automation of Wireless Sensor Networks Based on the IoT Paradigm," *Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2018*, pp. 2–7, 2018.
- [52] Semtech, "LoRa Modulation Basics AN1200.22," *App Note*, no. May, pp. 1–26, 2015. [Online]. Available: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- [53] T. T. Industries, "Spreading Factors | The Things Network." [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>
- [54] A. J. Cervelion-Bastidas, G. L. Agredo-Mendez, and J. Revelo-Fuelagan, "Design and performance assessment of the ami infrastructure for the universidad de narino's microgrid/diseño y evaluación de desempeño de la infraestructura ami para la microrred de la universidad de narino/desenho e avaliacao de desempenho de infraestrutura ami para a micro-rede da universidad de narino." *Revista Ingenieria Solidaria*, vol. 14, no. 26, 2018. [Online]. Available: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA585800601&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=19003102&p=IFME&sw=w>
- [55] W. D. Vizzotto, F. Gabriel Carioto, L. Maziero, F. G. Reck, F. Garcia Vedoin, C. H. Barriuello, D. Pinheiro Bernardon, and T. B. Marchesan, "Advanced Metering Infrastructure Case Study in Federal University of Santa Maria," *2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019*, 2019.
- [56] Y. Bagariang, M. I. Nashiruddin, and N. M. Adriansyah, "LoRa-based IoT Network Planning for Advanced Metering Infrastructure in Urban, Suburban and Rural Scenario," *2019 2nd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems, ISRITI 2019*, pp. 188–193, 2019.

- [57] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, and T. Hänninen, "Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology," *European Wireless Conference 2016, EW 2016*, pp. 119–124, 2016.
- [58] S. Soro and W. B. Heinzelman, "Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 955–972, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.08.006>
- [59] M. Berkelaar, "Lp solve reference guide." [Online]. Available: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/index.htm>~<http://web.mit.edu/lpsolve/doc/>
- [60] D. S. HOCHBAUM, *Approximation algorithms for NP-HARD problems*, 2006, vol. 9, no. 1.
- [61] G. Wang, Z. Yanxiao, J. Huang, Q. Duan, and J. Li, "A k-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network," 2016.
- [62] G. Wang, Y. Zhao, J. Huang, and R. M. Winter, "On the data aggregation point placement in smart meter networks." IEEE, 2017.
- [63] G. Wang, Y. Zhao, Y. Ying, J. Huang, and R. M. Winter, "A clustering algorithm for the dap placement problem in smart grid," vol. 219. Springer, 2018, pp. 349–359.
- [64] —, "Data aggregation point placement problem in neighborhood area networks of smart grid," *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, pp. 696–708, 8 2018.
- [65] A. Hassan, Y. Zhao, L. Pu, G. Wang, H. Sun, and R. M. Winter, "Evaluation of clustering algorithms for dap placement in wireless smart meter network," 2017.
- [66] S. Fortune, "Voronoi diagrams and delaunay triangulations," in *Handbook of Discrete and Computational Geometry, Third Edition*, 2017, pp. 705–721.