



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

“ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD Y DISEÑO DE UNA RED LORAWAN EN CUENCA PARA LA COMUNICACIÓN DE UNA RED DE SENSORES AMBIENTALES, ADMINISTRADA POR EL INSTITUTO DE ESTUDIOS DE RÉGIMEN SECCIONAL DEL ECUADOR (IERSE)”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

DIEGO FERNANDO ANDRADE PULGARÍN

STALIN ALEXANDER BRIGSS GUILLÉN

Director:

JAIME SEBASTIÁN BURBANO VILLAVICENCIO

CUENCA - ECUADOR

2023

I. INDICE DE CONTENIDOS

I.	INDICE DE CONTENIDOS	II
II.	INDICE DE FIGURAS	III
III.	INDICE DE TABLAS.....	IV
I.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	7
II.	DISEÑO DE LA RED	10
A.	MARCO LEGAL ECUATORIANO.....	10
B.	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD	11
<input type="checkbox"/>	<i>Factibilidad técnica</i>	11
<input type="checkbox"/>	<i>Factibilidad económica</i>	14
III.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE DISEÑO	15
A.	CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO	16
B.	ÁREAS DE COBERTURA.....	16
IV.	CONCLUSIONES	17
V.	REFERENCIAS.....	17

II. INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. POSICIONAMIENTO DE LPWAN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE DATOS DE TRANSMISIÓN Y EL RANGO [2].....	8
FIGURA 2. CONEXIÓN ESTRELLA RED LPWAN [5].	8
FIGURA 3. ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO LORAWAN [14]	9
FIGURA 4. ARQUITECTURA DE LA RED LORAWAN [15]	9
FIGURA 5. UBICACIÓN DE PRUEBA DEL GATEWAY EN LA FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, CALLE HERNÁN MALO Y AV. 24 DE MAYO. NODO1 EN LA IMAGEN REPRESENTA LA UBICACIÓN DE PRUEBA PARA EL ENLACE LORA	11
FIGURA 6. LORA TECHNOLOGY EVALUATION KIT 915MHZ-RN2903 [21]	11
FIGURA 7. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL TRANSMISOR, GATEWAY.....	12
FIGURA 8. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL TRANSMISOR, GATEWAY.....	12
FIGURA 9. MODELO DEL ÁREA DE COBERTURA DESDE EL PUNTO DE PRUEBA PARA UNA RED LORA.....	12
FIGURA 10. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE PRUEBA.	12
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DEL CONCENTRADOR GATEWAY.....	13
FIGURA 12. DATOS OBTENIDOS DE UNA COMUNICACIÓN EXITOSA ENTRE NODO Y GATEWAY, VERIFICADO EN EL SERVIDOR TTN.....	13
FIGURA 13. MAPEO DE LOS 104 PUNTOS DE PRUEBA.....	13
FIGURA 14. MAPEO DE LOS 51 PUNTOS DE PRUEBA EXITOSOS PROYECTADOS SOBRE LA SIMULACIÓN	13
FIGURA 15. PRUEBA DE DESPEJAMIENTO SIN LÍNEA DE VISTA.....	14
FIGURA 16. MUESTRA EL PERFIL GEOGRÁFICO VIABLE PARA LA COMUNICACIÓN PARA P71, PERO LAS EDIFICACIONES NO LO PERMITEN.	14
FIGURA 17. COMPARACIÓN DE LA SEÑAL RSSI DEL VALOR MEDIDO CON RESPECTO AL SIMULADO	15
FIGURA 18. MAPA DE TRANSPORTE PUBLICO CIUDAD DE CUENCA	16
FIGURA 19. PUNTOS CON MAYOR TRÁNSITO VEHICULAR EN CUENCA.....	16
FIGURA 20. UBICACIÓN DE LOS GATEWAY CON SUS ÁREAS DE COBERTURA CONSIDERADAS DE 600M.	16
FIGURA 21. ÁREA DE COBERTURA PARQUE INDUSTRIAL CUENCA	17
FIGURA 22. MAPA COMPARATIVO DE NODOS IERSE CON LA PROPUESTA ACTUAL	17

III. INDICE DE TABLAS

TABLA I. NIVELES DE RADIACIÓN PERMITIDOS POR LA UIT [16]	10
TABLA II. FRECUENCIAS LIBRES EN LOS DISTINTOS PAÍSES [18]	10
TABLA III. PARÁMETROS TÉCNICOS DEL CHIP LORA RN2903 INTEGRADO EN EL <i>GATEWAY</i> Y NODO FINAL [21]	11
TABLA IV. <i>GATEWAY</i> MIKROTIK	14
TABLA V. <i>GATEWAY</i> DRAGINO	14
TABLA VI. SENSOR LORAWAN DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y LUMINOSIDAD.	14
TABLA VII. MÓDULO DE COMUNICACIÓN LORA	14
TABLA VIII. PRESUPUESTO DE ENSAMBLAJE E INSTALACIÓN DE LA CAJA DE <i>GATEWAY</i>	15

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD Y DISEÑO DE UNA RED LORAWAN EN CUENCA PARA LA COMUNICACIÓN DE UNA RED DE SENSORES AMBIENTALES, ADMINISTRADA POR EL INSTITUTO DE ESTUDIOS DE RÉGIMEN SECCIONAL DEL ECUADOR (IERSE)

El Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), desde el 2018, administra una red de nodos sensores para el monitoreo continuo de variables meteorológicas y ruido en puntos estratégicos de Cuenca. Hoy en día, la comunicación se realiza a través de la red móvil GPRS. Sin embargo, el rendimiento de esta comunicación no ha sido la esperada. Por ello, el Instituto se encuentra en la búsqueda activa de diferentes tecnologías que permitan el correcto envío de la información capturada. En este contexto, este estudio presenta un análisis de factibilidad y diseño de una red LoRa WAN en Cuenca para la comunicación de la red de sensores ambientales administrada por el IERSE. Una red de comunicación confiable servirá de base para alcanzar una correcta resolución temporal, que permita poner la información obtenida en beneficio de los tomadores de decisiones y la población en general.

Palabras clave: LoRa, LoRa-WAN, ISM, RSSI, red de sensores, monitoreo ambiental.



Jaime Sebastián Burbano Villavicencio
Director de Tesis



Daniel Esteban Iturralde Piedra
Director de Escuela



Diego Fernando Andrade Pulgarín
Autor



Stalin Alexander Briggs Guillén
Autor

FEASIBILITY ANALYSIS AND DESIGN OF A LORAWAN NETWORK IN CUENCA FOR THE COMMUNICATION OF A NETWORK OF ENVIRONMENTAL SENSORS, MANAGED BY THE INSTITUTE FOR SECTIONAL STUDIES OF ECUADOR (IERSE)

The Institute of Sectional Regime Studies of Ecuador (IERSE), since 2018, manages a network of sensor nodes for the continuous monitoring of meteorological variables and noise at strategic points in Cuenca. Nowadays, communication is done through the GPRS mobile network. However, the performance of this communication has not been as expected. For this reason, the Institute is actively searching for different technologies that allow the correct delivery of the captured information. In this context, this study presents a feasibility analysis and design of a LoRa WAN network in Cuenca for the communication of the environmental sensor network managed by IERSE. A reliable communication network will serve as the basis to achieve a correct temporal resolution, which, the obtained information is directed for the benefit of decision makers and the population in general.

Keywords. - LoRa, LoRa-WAN, ISM, RSSI, sensor network, environmental monitoring



Jaime Sebastián Burbano Villavicencio
Thesis Director



Daniel Esteban Iturralde Piedra
School Director



Diego Fernando Andrade Pulgarín
Author



Stalin Alexander Brigss Guillén
Author

Translated by:



Diego Fernando Andrade Pulgarín



Stalin Alexander Brigss Guillén



Análisis de factibilidad y diseño de una red LoRaWAN en Cuenca para la comunicación de una red de sensores ambientales, administrada por el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE)

Diego Fernando Andrade Pulgarín
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
diegoap@uazuay.edu.ec

Stalin Alexander Brigss Guillén
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
gatobrigss@es.uazuay.edu.ec

Resumen. – El Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), desde el 2018, administra una red de nodos sensores para el monitoreo continuo de variables meteorológicas y ruido en puntos estratégicos de Cuenca. Hoy en día, la comunicación se realiza a través de la red móvil GPRS. Sin embargo, el rendimiento de esta comunicación no ha sido la esperada. Por ello, el Instituto se encuentra en la búsqueda activa de diferentes tecnologías que permitan el correcto envío de la información capturada. En este contexto, este estudio presenta un análisis de factibilidad y diseño de una red LoRa WAN en Cuenca para la comunicación de la red de sensores ambientales administrada por el IERSE. Una red de comunicación confiable servirá de base para alcanzar una correcta resolución temporal, que permita poner la información obtenida en beneficio de los tomadores de decisiones y la población en general.

Palabras clave. - LoRa, LoRa-WAN, ISM, RSSI, SF, red de sensores, monitoreo ambiental.

I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) actualmente administra una red de sensores de variables ambientales referentes a temperatura, humedad, presión y ruido ambiental. Con ello, se busca presentar un instrumento que ayude a los tomadores de decisiones en la generación de políticas ambientales fundamentadas, además de divulgar dicha información a la ciudadanía en general.

Desde la primera etapa de implementación en 2018, el IERSE ha mantenido una relación de dependencia con un único proveedor para los equipos de monitoreo implementados, debido a un modelo post venta que lo obliga a utilizar exclusivamente los servicios técnicos del mismo.

Este hecho dificulta en gran medida el mantenimiento, la flexibilidad y la estabilidad de la red, imponiendo el uso de determinado hardware y tecnologías específicas. Los equipos se comunican a través de la red móvil de telecomunicaciones 4G hacia un servidor local ubicado en las instalaciones de la Universidad del Azuay. Si bien los paquetes de datos enviados son relativamente livianos (menor a 100 bytes) y la comunicación de estos se realiza cada 10 minutos, el Instituto experimenta problemas para mantener una comunicación estable.

En la mayoría de los puntos estratégicos, con el fin de medir el ruido generado principalmente por el parque automotor, los equipos se colocan en los postes junto a las carreteras entre 6 a 12 m de altura. En ocasiones, están ubicados en “callejones” del centro de la ciudad formados por las edificaciones, por lo que tienden a fallar. Otro de los inconvenientes surge debido al hardware empleado por las estaciones que no necesariamente se adapta al mercado nacional. Por estos motivos, el IERSE inició en el 2022 un proyecto para desarrollar e implementar una red de sensores propia con un sistema de comunicación redundante. En este contexto, el primer paso involucra un estudio de factibilidad sobre la implementación de una red LoRaWAN, ya que esta es capaz de lograr una comunicación de larga distancia y los tamaños de transmisión de datos por paquete se adaptan a las necesidades de la red de nodos sensores.

LoRaWAN pertenece al grupo de redes LPWAN (Low Power Wide Area Network), que son una de las soluciones más prometedoras para establecer una comunicación de máquina a máquina (M2M) y es además, ampliamente utilizada en IoT (Internet of Things) debido a su largo alcance y la baja potencia que requiere para funcionar [1]. Debido a ello, LPWAN ha ganado importancia en la industria y en especial en el monitoreo remoto. En cuanto al rango de alcance de los sistemas LPWAN, la Figura 1

muestra una comparación con los demás sistemas de comunicación inalámbricos [2].

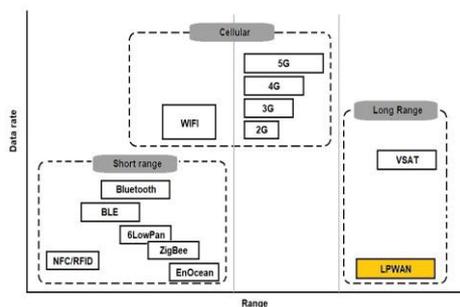


Figura 1. Posicionamiento de LPWAN con respecto a la velocidad de datos de transmisión y el rango [2].

Las redes LPWAN no se implementan para producir velocidades más rápidas que requieren algunos sistemas sino por el contrario, crean una comunicación de baja potencia para dispositivos pequeños como sensores y medidores inteligentes [3].

La arquitectura de una red LPWAN se basa principalmente en una conexión estrella (Véase Figura 2) y se denomina así debido a que involucra a varios dispositivos finales con el nombre de nodos, los cuales se comunican de manera directa con un dispositivo central, cuya función es la de realizar el enrutamiento, enviando los datos adquiridos por los nodos hacia un servidor que le permita al administrador controlar y realizar acciones [4].

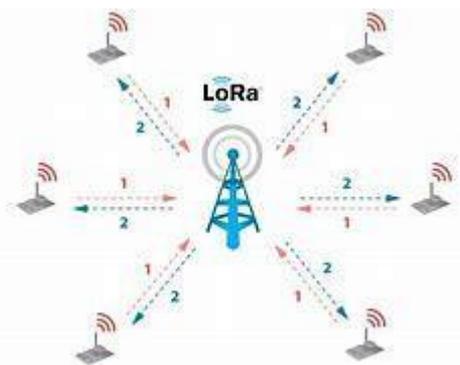


Figura 2. Conexión estrella red LPWAN [5].

Este tipo de arquitectura se encuentra conformada por cuatro componentes principales [6]:

- **Nodos o dispositivos finales:** Se comunican con un *Gateway* mediante radiofrecuencia que utiliza la modulación LPWAN. Los paquetes se transmiten de manera encriptada.
- **Gateway o concentrador de datos:** Se encarga de gestionar la red de los nodos y recopila la información obtenida por los mismos.
- **Servidor de red:** Representa al dispositivo que contiene los datos obtenidos por los nodos y se

encarga de decodificar la información obtenida por los mismos. Los servidores de red se encuentran en la nube.

- **Aplicación o usuario:** Sistema que muestra los datos obtenidos a los diferentes usuarios que requieran conocer la información que se ha capturado.

Las redes LPWAN tienen varias aplicaciones en el marco de las ciudades inteligentes, a través de la mejora que ofrecen en distintas actividades, como ser monitores del clima, medidores de consumo de energía y agua e incluso para la preparación de alertas en caso de emergencia [8]. Algunas de las características de los enlaces LPWAN son:

Baja potencia: Los dispositivos requieren baterías de baja potencia, además de la ventaja de que su duración es de varios años [9].

- **Amplia área de cobertura:** La cobertura de las redes LPWAN es de mayor alcance en comparación con otro tipo de redes, puede superar los 2 km en áreas urbanas y cerca de los diez kilómetros en áreas rurales [10]. Sin embargo, estos son datos teóricos que no siempre se adaptan a la geografía del área en cuestión. Factores como el perfil geográfico, edificios, vegetación, entre otros pueden afectar significativamente el área de cobertura.

- **Bajo costo:** debido a su modo de conexión, resulta bastante económico el diseño de hardware e infraestructura de la red. Además, el uso de la banda es libre [11].

- **Escalabilidad:** Permite realizar un crecimiento de la red en corto plazo. Por lo tanto, los dispositivos están diseñados para almacenar más información, permitiendo así expandir la red. Un solo Gateway puede comunicarse con varias decenas de nodos [11].

A pesar de las múltiples prestaciones que LPWAN ofrece, ésta también posee ciertas desventajas. Debido a que demandan un bajo consumo de energía y son capaces de cubrir grandes distancias, la cantidad de datos a transferir es relativamente limitada. Por ejemplo, no pueden utilizarse para transmitir llamadas de voz o hacer video transferencias. Además, en el caso específico de LoRa, el usuario debe encargarse de administrar los *Gateway* y los nodos que conforman la red. Finalmente, los chips disponibles son solo del proveedor SEMTECH.

• Clasificación de las redes LPWAN

Las redes LPWAN se clasifican de la siguiente manera:

- **SIGFOX:** La tecnología SIGFOX consiste en una red de operadores. Esta empresa se encarga de desplegar, instalar y brindar mantenimiento para todo tipo de infraestructura SIGFOX y así brindar una gran cobertura a una región. Está diseñada para que cualquier dispositivo se pueda conectar a la red siempre y cuando pague una suscripción [12].
- **NB-IoT:** Está basada en 3GPP (3rd Generation Partnership Project: Proyecto Asociación de Tercera

Generación), utilizada como estándar en los dispositivos móviles (celulares). Debido a que este tipo de tecnología utiliza modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), los chips utilizados son más complejos con respecto a su estructura y sus funciones. Sin embargo, el alcance de estos es mucho mejor. Los usuarios obtienen un alto rendimiento, pero, en consecuencia, se tiene un mayor consumo de energía y mayor complejidad. Es utilizada para enviar y recibir bajas cantidades de datos como en el caso de algunas aplicaciones de IoT [13].

- LoRa: Utiliza una modulación en radiofrecuencia patentado por SEMTECH, llamado Chirp Spread Spectrum. Opera en las bandas de ISM (Intersite Service Messaging) a una frecuencia de e 433, 868 o 915 MHz, dependiendo de la región en la cual se vaya a utilizar [14].

Este trabajo se centra en la tecnología LoRa y su factibilidad de implementación para la red de nodos sensores del IERSE.

LoRaWAN es un protocolo estandarizado por LoRa Alliance de manera abierta, que brinda comunicación bidireccional, localización y movilidad. Trabaja con una modulación inalámbrica que permite enlaces de largo alcance (ver Figura 4) [14].

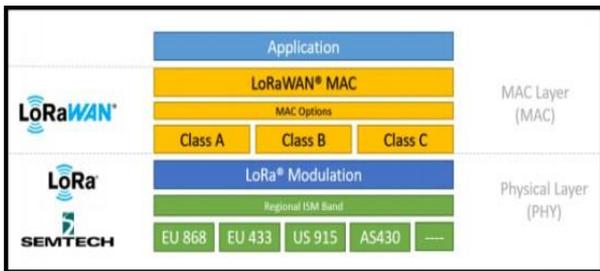


Figura 3. Estructura del protocolo LORAWAN [14].

La arquitectura que utiliza la red de comunicación LoRaWAN es de tipo estrella, donde los nodos se comunican con varios Gateway y estos a su vez se comunican con el servidor. La Figura 4 ilustra un diagrama simplificado de la arquitectura descrita.

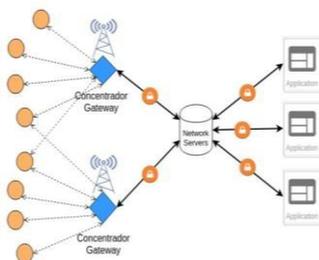


Figura 4. Arquitectura de la red LoRaWAN [15].

Este tipo de comunicaciones son ideales para aquellas aplicaciones donde una infraestructura de red tiene que operar de forma autónoma en amplias áreas. Por ello se adecua a los requerimientos de las redes de sensores inalámbricos de monitoreo en aplicaciones IoT.

Existen tres clases de nodos LoRa:

- Clase A: Este tipo de dispositivo pasa la mayor parte del tiempo en modo inactivo, cuando detecta alguna alteración en el medio o en el dato que este recopilando información, envían la información durante un segundo y esperan recibir la señal de llegada en el Gateway y vuelven a entrar en modo inactivo.
- Clase B: Este dispositivo es mejorado con respecto a la clase A, ya que permite enviar datos en tiempo fijo y programados para que el dispositivo final reciba la señal de la red.
- Clase C: Los dispositivos de esta clase no generan un mayor consumo de potencia en relación a las otras clases, y, ofrecen la menor latencia para la comunicación servidor-dispositivo final [10].

En cuanto a términos de frecuencia, LoRaWAN opera en las frecuencias menores a 1 GHz. Estas bandas dependen de la región en la que se encuentren, como se describe a continuación.

- EUROPA: Banda ISM de 863- 870 MHz con 8 canales con un ancho de banda de 0.3 MHz por canal.
- AMÉRICA: Banda ISM de 902-928 MHz, con 13 canales con un ancho de banda de 2,16 MHz por canal.
- ASIA: Banda de 433 MHz.

Debido a sus altas prestaciones, LoRaWAN ha sido utilizada en varios estudios relacionados a las redes de sensores inalámbricos. A continuación, se analizan algunos de ellos con el fin de sentar una base del estado del arte que direcciona el análisis de factibilidad y posterior diseño a realizarse.

En [16], se desarrolla un prototipo para medición inteligente del consumo de energía eléctrica con tecnología LoRa. En el estudio, se realizó investigación tanto bibliográfica como de campo a través de la comparativa con medidores existentes en dos hogares. El prototipo basó su arquitectura en las redes LPWAN, por lo que estuvo constituida por tres partes o bloques: Nodos Finales, Gateway y Servidor. Para la transmisión de datos, se utilizó el módulo Heltec WiFi Lora 32, dadas sus características de comunicación inalámbrica. Para la selección de hardware del servidor se tomó en cuenta que debe mantenerse en funcionamiento continuo, por lo que se eligió realizarlo en un hardware simple exclusivamente para la realización de esa tarea, siendo la opción más adecuada Raspberry Pi. La investigación determinó que en zonas densamente pobladas y con un terreno irregular, se tiene un alcance efectivo de 600m con pérdidas de 171.64dB, tomando en cuenta la frecuencia de operación LoRa de 915MHz.

El estudio de Álvarez [17], se centró en el diseño de una red inalámbrica de bajo consumo para prevenir y detectar incendios forestales, donde se compararon diferentes tecnologías para IoT. Cabe recalcar que, para la selección de los componentes se ha considerado el consumo de corriente y el coste final, con el objetivo de contar con un sistema no solo de bajo consumo, sino de bajo costo. El resultado fue un módulo con una autonomía prevista de casi 3 años. Si se considera el reducido mantenimiento una vez hecha la instalación de los módulos, resulta atractiva y a la vez acertada esta red inalámbrica de bajo consumo.

La investigación de Heredia y Lucero [18] se centra en evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de la tecnología LoRa en ambientes industriales, para ello, se utilizó un equipo Heltec WiFi LoRa, orientado a IoT. Su funcionamiento se basa en el microcontrolador ESP32, valiéndose del chip integrado SX1278, para las funciones de comunicación LoRa. Este sistema ha sido configurado para operar como nodo, y puede configurarse como *Gateway* para una red LoRaWAN. Así mismo, se hace uso del miniordenador Raspberry Pi 3 modelo B, como administrador de la red LoRaWAN y servidor web, permitiendo establecer una conexión con aplicaciones e interfaces gráficas a fin de presentar los datos recabados de una forma amigable al usuario. La configuración de los equipos usados en este trabajo se basa en las directrices de The LoRa Alliance para la topología de una red LoRaWAN. La capa física usa la frecuencia de 433.175 MHz dentro de la banda EU433, utilizando el chip SX1278 de SEMTECH, para transmisor a partir del nodo sensor se conectan a través de un puerto serial al módulo Heltec WiFi LoRa 32. cuanto a la configuración de *Gateway*, el chip SX1278 de la tarjeta Heltec WiFi LoRa 32 es el encargado de recibir las transmisiones LoRa, mismas que son procesadas por el microcontrolador ESP32, que las empaqueta y transmite por una red IP usando el módulo WiFi integrado. Para la configuración del servidor LoRa WAN, fue necesario montarlo sobre un Raspberry Pi modelo B.

Los procesos de medición se centraron en el envío de paquetes desde el nodo sensor hacia el Gateway manteniendo el Spreading Factor (SF) o factor de dispersión que es la relación entre el ancho de banda y los símbolos transmitidos, en un valor aproximado de 7 y una frecuencia de 433.175 MHz (constante). Se colocó a 1.5m de altura el equipo transmisor, mientras que el *Gateway* se colocó a diferentes alturas, con el fin de mantener una línea de vista con el nodo transmisor. Esto último dependió de las condiciones de los ambientes.

Los resultados llevaron a concluir que el dispositivo Heltec WiFi LoRa 32, denota características que le permiten ser configurado tanto como nodo transmisor, así como *Gateway* de un solo canal, mostrándose una opción idónea para la transmisión de datos en ambientes industriales con dispositivos de bajo costo. Así mismo, el ordenador Raspberry Pi y el sistema operativo basado en Linux con el cual opera, han mostrado ser efectivos al administrar la red LoRa WAN y actuando como un servidor web.

En [19], se buscó generar información en tiempo real sobre la temperatura en cultivos, a fin de que los agricultores sean capaces de tomar decisiones oportunas y acertadas, lo que conduciría a un incremento en la producción, así como reducción de las pérdidas agrícolas. Se construyó una red punto a punto con dos módulos LoRa para constatar en tiempo real el valor de la temperatura, la intensidad de la señal recibida RSSI por sus siglas en ingles Received Signal Strength Indicator, así como la cantidad de paquetes enviados y recibidos. Finalmente, se desarrolló un servidor web asincrónico con la capacidad de dar respuesta a peticiones desde la página web, donde dichos requerimientos generan llamadas al sensor para enviar los datos referentes a la página web.

II. DISEÑO DE LA RED

A. Marco Legal Ecuatoriano

En el Ecuador, según lo publicado por la ARCOTEL, se indica que el país se acoge a lineamientos descritos por la UIT [20]. En este marco, nuestro país se encuentra ubicado en la región 2, por lo que los niveles de radiación permitidos corresponden a los que se muestran en la Tabla I.

TABLA I. NIVELES DE RADIACIÓN PERMITIDOS POR LA UIT [16].

Banda de frecuencia	Frecuencia central	Intensidad de campo eléctrico (dbuv/m)
6765 – 6795 kHz	6780 kHz	80 – 100
26957 – 27283 kHz	27120 kHz	70 – 120
13553 – 13567 kHz	13560 kHz	80 – 120
2400 – 2500 MHz	2450 MHz	30 - 120
902 – 928 MHz	915 MHz	60 – 120
40.66 – 40.70 MHz	40.68 MHz	60 – 120

La red de comunicación LoRa utiliza las frecuencias que se encuentran libres dependiendo de la región en la cual este ubicada. En la Tabla II se resumen las frecuencias permitidas en los distintos países.

TABLA II. FRECUENCIAS LIBRES EN LOS DISTINTOS PAÍSES [18].

Banda de frecuencia	Nombre común
EU863-870	EU868
RU864-870	RU864
IN865-867	IN865
KR920-923	KR920
AS923	AS923
CN470-510	CN470
AU915-928	AU915
EU433	EU433
CN779-787	CN779
US902-928	US915

En Ecuador la frecuencia permitida es de 915 a 928 MHz. Por lo tanto, el plan de frecuencia que se puede utilizar es: US902-928, AU915-928 y AS923 [16].

B. Estudio de Factibilidad

En la primera sección de este documento, se llevó a cabo una investigación sobre la tecnología LoRa y la diferencia con LoRaWAN. Sus ventajas y desventajas, con el objetivo de proponer un modelo que puede ser aplicable y brinde resultados confiables aterrizados al territorio de Cuenca. En esta sección se analiza la factibilidad de la implementación de una red LoRaWAN desde el punto de vista técnico y también económico. Sin embargo, cabe mencionar que, respecto al tema económico, únicamente se contemplan los costos de implementación de los nodos y los Gateway, mano no el mantenimiento de la red, ya que este dependerá directamente de los recursos que puedan ser asignados por el IERSE para este propósito.

- *Factibilidad técnica*

Como parte del estudio técnico se declaró la utilización de un software de simulación para proyectar la cobertura de LoRaWAN en el cantón Cuenca. Además, con el uso del software Google Earth Pro se realizó un análisis de los perfiles de elevación del cantón y en una fase posterior, se comprobó el modelo simulado.

Inicialmente, se propone como punto de prueba el edificio de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay para la ubicación del Gateway. Esta decisión se realiza principalmente debido a la fácil accesibilidad al mismo por parte del Instituto (al ser una infraestructura perteneciente a la universidad) y su prometedora ubicación con una amplia línea de vista de la ciudad. A partir de aquí, se realizan las simulaciones y las pruebas de campo para el enlace entre el concentrador o Gateway y los sensores o nodos finales (Véase Figura 5).

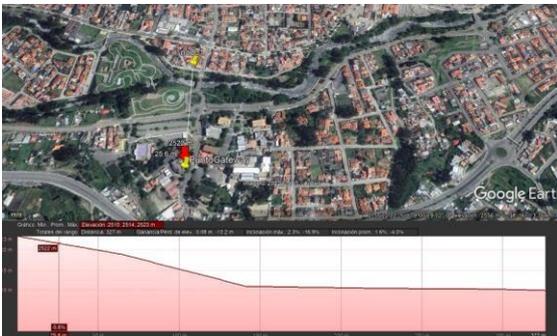


Figura 5. Ubicación de prueba del Gateway en la Facultad de Ciencia y Tecnología, Calle Hernán Malo y Av. 24 de mayo. Nodo1 en la imagen representa la ubicación de prueba para el enlace LoRa.

Para realizar las pruebas de cobertura, se emplea un nodo comercial LoRa modelo RN2903. En la Tabla III se observan los parámetros técnicos del chip LoRa del fabricante Microchip integrado en el Gateway y sensor (nodo 1) que se utilizará para la simulación y su posterior verificación en las pruebas de campo. En la Figura 6 se observa el Kit de evaluación de 915 MHz-RN2903 empleado.



Figura 6. LoRa Technology Evaluation Kit 915MHz-RN2903 [21].

TABLA III. PARÁMETROS TÉCNICOS DEL CHIP LORA RN2903 INTEGRADO EN EL GATEWAY Y NODO FINAL [21].

Características	Valor	Unidad
Voltaje de operación	2.1 a 3.6	V
Rango de temperatura	-40 a 85	°C
Bit rate LoRa	12500	bps
Bit rate FSK	300	Kbps
Banda de frecuencia	915	MHz
Potencia TX (configurable hasta)	18.5	dBm
Sensitividad RX (hasta)	-146	dBm
Modulación	FSK, GFSK, LoRa	-
Área cobertura suburbana	15	Km
Área cobertura urbana	5	Km

- *Modelo de simulación*

En el software Xirio Online, se realiza la simulación desde el punto de prueba para estimar el área de cobertura. Los parámetros que se requiere configurar son referentes a las características del emplazamiento o lugar de estudio y los parámetros de los equipos que se utilizarán en las pruebas de campo. Ya que el concentrador recibiría la información de diferentes sensores, se especifica primero la posición del concentrador o Gateway, el mismo que en coordenadas geográficas se encuentra en la latitud -2.919509 y longitud -79.00148.

Otros parámetros definidos en el software corresponden al tipo de antena, la ganancia de la antena, la altura de la

antena, la potencia del transmisor, las frecuencias de los ocho canales que utiliza según la normativa ecuatoriana para los enlaces que utilicen la banda libre para tecnologías como LoRaWAN. Esta información se ilustra en la Figura 8 y Figura 9.

Propiedades del transmisor

Transmisor

Nombre:

Emplazamiento

Emplazamiento:

Coordenadas

Latitud:

Longitud:

Parámetros de radio

Antena:

Altura antena: m

Orientación: °

Inclinación mecánica: °

Inclinación eléctrica: °

Referencia de alturas de antenas

Alturas respecto a:

Usar altura de edificio:

Altura edificio: m

Figura 7. Configuración de parámetros del transmisor, Gateway.

Frecuencias de transmisión

Frecuencias	Canal
923.300 MHz	7
923.900 MHz	10
924.500 MHz	13
925.100 MHz	16
925.700 MHz	19
926.300 MHz	22
926.900 MHz	25
927.500 MHz	28

Polarización:

Feeder:

Longitud del feeder: m

Pérdidas del feeder: dB

Pérdidas pasivos: dB

Potencia: dBm

Figura 8. Configuración de parámetros del transmisor, Gateway.

Xirio Online permite integrar puntos de interés o estudio y estimar en dicho punto el valor RSSI, que nos ayudará a comparar con los valores obtenidos en las pruebas de campo. En la Figura 10, se visualiza el área de cobertura. El color rojo representa los lugares donde se tendría enlaces de radio comunicación considerados con señal baja y las áreas de color claro representan los lugares donde se espera tener mayor intensidad de señal y se puede esperar un enlace correcto.

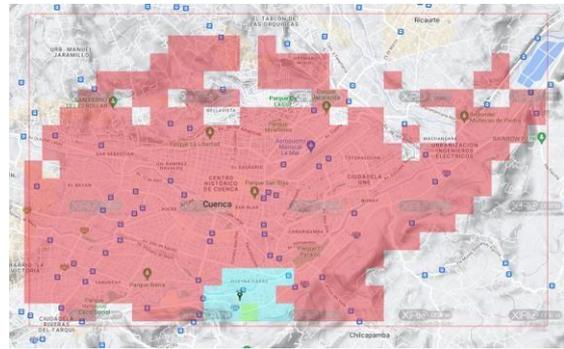


Figura 9. Modelo del área de cobertura desde el punto de prueba para una red LoRa.

- **Pruebas de campo.**

En esta sección, se enumeran los pasos que se siguieron para determinar la cobertura de la red LoRaWAN, misma que se contrastará con la proyección de cobertura previamente obtenida mediante la simulación.

Siguiendo los lineamientos para presentar un estudio de telecomunicaciones en Ecuador se tomó como punto central la ubicación del Gateway y se proyectaron:

1. Ocho circunferencias con un radio de 500m para obtener mayores puntos de prueba alrededor del Gateway principal. A mayor distancia se cubre menos superficie.
2. Líneas desde el Gateway con un ángulo de separación de 15°.
3. Los puntos de intersección entre las circunferencias y las líneas proyectadas serán los puntos de prueba del estudio.
4. Se analiza hasta una distancia de 4km.



Figura 10. Ubicación de los puntos de prueba.

En total se definieron 104 puntos de interés y se procedió a integrar el punto del concentrador o *Gateway*. Cabe mencionar que el *Gateway* que forma parte del LoRa Technology Evaluation Kit 915MHz-RN2903 de Microchip tiene un puerto Ethernet para comunicarse con el servidor LoRa de nuestra preferencia. Por facilidad se integró un módem de una operadora celular con un plan de datos en el interior de una caja para exteriores. Esto permitió realizar las pruebas con mayor libertad. Se implementó solo una acometida eléctrica en el techo del edificio de la Facultad de Ciencia y Tecnología para alimentar el Gateway y el módem. La Figura 11 ilustra la instalación de los dispositivos.



Figura 11. Distribución del concentrador Gateway.

Luego de verificar la estabilidad con la conexión a Internet, se comunicó el Gateway al servidor de acceso gratuito The Things Network (TTN), que es un proyecto que tiene servidores dedicados para redes LoRaWAN.

El dispositivo llamado Mote del LoRa Technology Evaluation Kit 915MHz-RN2903 de Microchip (Ver Figura 6) es el dispositivo con el que se realizará las pruebas de campo para definir la intensidad de señal RSSI en los puntos de interés y así, definir la factibilidad de implementar una red LoRaWAN en el cantón Cuenca. El nodo o sensor de pruebas está configurado para enviar la información al Gateway y este último transmitirá lo recibido al servidor TTN. La Figura 13 muestra un ejemplo de comunicación exitosa entre el nodo Mote, el Gateway y la carga de los datos recibidos en el servidor TTN.

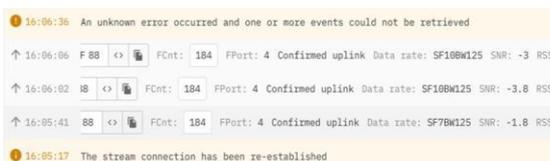


Figura 12. Datos obtenidos de una comunicación exitosa entre nodo y Gateway, verificado en el servidor TTN.

En la Figura 12, también se puede apreciar el puerto de comunicación que genera el nodo de prueba, ya que trabaja con el protocolo LoRaWAN y los valores de la Relación Señal a Ruido (SNR) y la señal RSSI. Estos

dos valores son los que el Gateway entrega como información cuando realiza la comunicación de manera exitosa. En la información se encuentra también la identificación del sensor.

En la Figura 13 se observa de color verde y azul los puntos donde se obtuvo una comunicación exitosa. La diferencia de color está en que el sensor estaba configurado para enviar tres paquetes de datos. El color verde indica que el 100% de los paquetes fueron recibidos exitosamente, mientras que el color azul indica que el Gateway recibe un solo paquete. Finalmente, los puntos marcados con color rojo indican que no se logró establecer la comunicación.

Se realizó una prueba de enlace en cada uno de los 104 puntos propuestos para las pruebas de campo. En total se obtuvieron 52 pruebas exitosas. Adicionalmente, se realizaron pruebas no registradas en el interior de edificios y puntos cercanos a un punto donde no se logró comunicación. Estas pruebas permiten observar el comportamiento del enlace LoRa sin línea de vista o con poco despejamiento.



Figura 13. Mapeo de los 104 puntos de prueba.

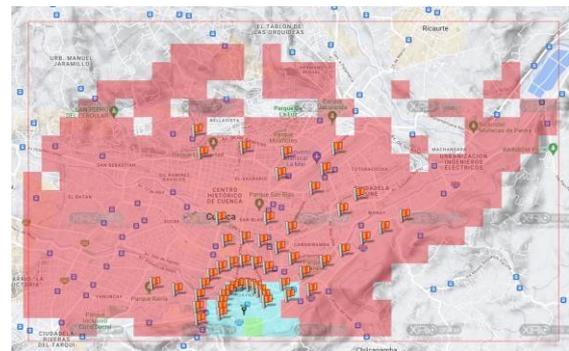


Figura 14. Mapeo de los 51 puntos de prueba exitosos proyectados sobre la simulación.

La Figura 15 demuestra cómo al realizar una prueba en el P71, ubicado en la calle Pío Bravo y Hno. Miguel, no existe cobertura. Las características de altura de las viviendas no permiten el enlace. Pero al desplazarnos a la ubicación en la calle Hno. Miguel y Rafael Ma. Arizaga se puede realizar el

enlace, aunque no se tiene línea de vista, pero sí está en una ubicación con despejamiento suficiente.



Figura 15. Prueba de despejamiento sin línea de vista.

En la Figura 17, se observan los puntos P71 y el punto de prueba. El perfil de la trayectoria desde el Gateway hasta cada uno de ellos en teoría establece que existiría un enlace favorable en P71 si el sensor tuviera la altura adecuada, pero como se mencionó para este caso particular, las edificaciones no permiten dichas condiciones. Existen características puntuales de la ciudad que se deben considerar en las ubicaciones de los sensores y el Gateway.

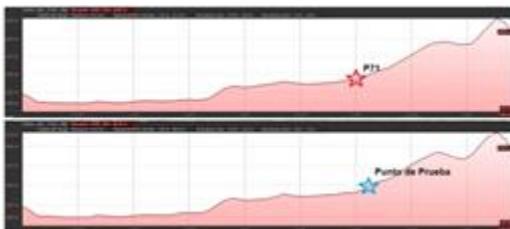


Figura 16. Muestra el perfil geográfico viable para la comunicación para P71, pero las edificaciones no lo permiten.

- **Factibilidad económica**

En la actualidad, la difusión y crecimiento a nivel global de la utilización de la tecnología LoRaWAN ha permitido que diferentes organizaciones vean una oportunidad comercial en el desarrollo de dispositivos, aplicaciones y servidores específicos para LoRa. Esto también ha provocado la reducción de los precios de adquisición.

A continuación, la Tabla IV y la Tabla V presentan dos opciones de equipos Gateway existentes en el mercado y las características de cada uno de ellos:

TABLA IV. GATEWAY MIKROTIK.

Ítem	Descripción	Marca	Modelo	Cant	Precio Unitario	Precio Total
1	Gateway y (incluye antena 6,5 dBi)	Mikrotik	Wap LR9 kit	1	316,00	316,00
2	Instalación	na	na	1	124,22	124,22

TABLA V. GATEWAY DRAGINO.

Ítem	Descripción	Marca	Modelo	Cant	Precio Unitario	Precio Total
1	Gateway (incluye antena)	Dragino	HP0A	1	616,00	616,00
2	Instalación	na	na	1	124,22	124,22

Así mismo, en las tablas siguientes se indican opciones comerciales para los dispositivos de sensores o nodos finales.

TABLA VI. SENSOR LORAWAN DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y LUMINOSIDAD.

Ítem	Descripción	Marca	Modelo	Cant	Precio Unitario	Precio Total
1	LHT65S-E5 (incluye antena) sensor LoRaWAN Temperatura, Humedad, Luminosidad	Dragino	HP0A	1	75,00	75,00
2	Instalación	na	na	1	15,00	15,00

TABLA VII. MÓDULO DE COMUNICACIÓN LORA.

Ítem	Descripción	Marca	Modelo	Cant	Precio Unitario	Precio Total
1	Gateway (incluye antena)	Dragino	HP0A	1	616,00	616,00
2	Instalación	na	na	1	124,22	124,22

En la Tabla VIII se muestra el presupuesto del ensamblaje e instalación de una caja para implementar en un poste o mástil, así como también para la alimentación de energía y protección eléctrica. La caja también tiene espacio para un módem u ONT para la conexión de Internet del Gateway o concentrador si este dispositivo no dispone de un slot para chip GPRS.

TABLA VIII. PRESUPUESTO DE ENSAMBLAJE E INSTALACIÓN DE LA CAJA DE GATEWAY.

Ítem	Descripción	UM	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Tablero plástico SBOX 40X30X16cm	Unidad	1,00	50,00	50,00
2	Canaleta ranurada gris 25X40mm 2mt	Cm	0,20	5,05	1,41
3	Abrazadera EMT doble 1-1/2	Unidad	2,00	0,45	0,90
4	Grapa EMT 1 pulgada doble oreja	Unidad	1,00	0,13	0,13
5	Tomillo lilim c/tuerca 5X20	Unidad	4,00	0,09	0,38
6	Tornillo punta broca c/llave 10X3/4	Unidad	10,00	0,05	0,48
7	Tornillos punta de broca c/sombbrero 8X1	Unidad	8,00	0,01	0,11
8	Bota RJ45 colores generic	Unidad	1,00	0,10	0,10
9	Prensa estopa 22.3mm cable 10-14mm	Unidad	2,00	0,42	0,85
10	Prensa estopa 22.3mm cable 5-10mm	Unidad	3,00	0,30	0,89
11	Tubo antena recta	Unidad	2,00	10,00	20,00
12	Cable coaxial RG5 antena	Unidad	1,50	0,88	1,32
13	Cable THHN 3*14 AWG 90 6000V 4400880 INCA	Unidad	3,00	0,77	2,31
14	Cooper toma doble sobrepolar 15A 125V	Unidad	1,00	2,16	2,16
15	Tubería BXXC/PVC 12"	Mts	3,00	1,96	5,88
16	Breaker QO 1P 10A ENC	Unidad	1,00	5,29	5,29
17	Base breaker square-D7	Metros	1,00	3,66	3,66
18	Cinta heriban 3/4 X 1mts (30mts c/rollo)	Unidad	2,40	1,27	3,06
19	Hebillas de 3/4 P/cinta heriban Bandimex	Unidad	2,00	0,5	1,01

20	Conector BX PVC recto 1/2"	Unidad	4,00	0,90	3,60
21	Costo ensamble	Unidad	1,00	3,60	3,60
22	Costo instalación	Unidad	1,00	6,09	6,09
Costo por sitio					113,21

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE DISEÑO

Para observar la diferencia entre los puntos donde sí se logró un enlace exitoso durante la realización de las pruebas de campo con respecto a la señal RSSI en el mismo punto de la simulación, se generó una tabla para graficar y contrastar los mismos. En las pruebas de campo, se obtuvo un enlace con confirmación en el servidor LoRa a la distancia máxima de 4KM en tres puntos de prueba.



Figura 17. Comparación de la señal RSSI del valor medido con respecto al simulado.

En la Figura 17, se observa la respuesta del modelo utilizado para la simulación que es el de Okumura-Hata modificado en color azul. Aquí, la respuesta tiene la forma de una curva que decae en relación con la distancia. Por otra parte, la respuesta de color naranja es variable y muestra la atenuación de la señal RSSI. Esta última corresponde a la respuesta de las pruebas de campo.

De los resultados observados, un enlace LoRa es factible cuando existe el despejamiento suficiente entre la ubicación del sensor con respecto a la ubicación del Gateway. Por este motivo es importante que el Gateway tenga la mayor altura posible para superar la mayor parte de los obstáculos presentes en el trayecto al sensor.

Otras pruebas realizadas en campo al interior de edificios, muestra que es posible la comunicación del sensor de prueba sin línea de vista siempre que se encuentre dentro de un área de cobertura con un radio promedio de 600m del Gateway.

A. Consideraciones para el diseño

Debido a que un objetivo es adquirir datos de variables ambientales por medio de una red LoRa se considera basar el diseño en los puntos de mayor circulación de las rutas de transporte público en la ciudad, además de los espacios o lugares mayormente concurridos.

La Figura 18 corresponde al mapa de transporte de la ciudad de Cuenca. En la ciudad existen 35 rutas de transporte público que en algunos puntos provocan mayor contaminación y tráfico vehicular. Estas rutas generalmente pasan por lugares populares o de mayor congregación de personas como hospitales, mercados, entidades públicas, unidades educativas, etc. El mapa presentado se utilizó para marcar los puntos de interés y proyectar la ubicación de los nodos finales.



Figura 18. Mapa de transporte público ciudad de Cuenca.

Al georreferenciar los puntos de interés, se obtiene 71 marcas donde las rutas del transporte público se cruzan y juntamente con la ubicación de 22 lugares de interés se plantea definir la ubicación de los concentradores LoRa.



Figura 19. Puntos con mayor tránsito vehicular en Cuenca.

Los puntos de interés georreferenciados en la Figura 19, son propuestos como las ubicaciones para los nodos finales o sensores y de los lugares de mayor concurrencia se define el sector del parque industrial

con las lagunas de oxidación de la ciudad, ya que se cree que son lugares con un mayor grado de contaminación. También en el sector del parque industrial se adicionan dos puntos más para cubrir de mejor manera ese sector.

La definición de los puntos y de las áreas seleccionadas es la siguiente:

- Marca verde: punto de convergencia de las rutas de transporte.
- Perfil rojo: áreas o locaciones con mayor concurrencia de personas.
- En el sector del parque industrial de la ciudad de Cuenca se suma dos marcas de color amarillo para la ubicación de dos nodos finales o sensores.

B. Áreas de cobertura

Para determinar las áreas de cobertura, se busca agrupar la mayor cantidad de puntos considerando que el *Gateway* o concentrador debe ser el centro de un área de cobertura con un radio de 600m aproximados, valor que fue determinado en el análisis de la simulación y pruebas de campo de los enlaces de radiofrecuencia.

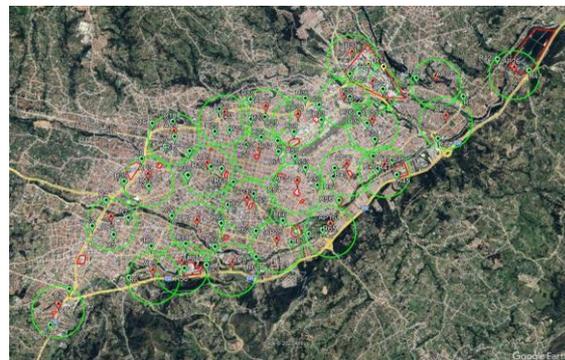


Figura 20. Ubicación de los Gateway con sus áreas de cobertura consideradas de 600m.

La Figura 20 muestra las marcas utilizadas en la proyección de diseño y que corresponden a los puntos para la ubicación de los sensores y áreas de interés. Adicional, se puede ver la proyección de los concentradores y áreas de cobertura.

- Marcas de color rojo son los *Gateway* o concentradores georreferenciados.
- Círculo de color verde que proyecta el área de cobertura del radio enlace con un radio de 600m.



Figura 21. Área de cobertura parque industrial Cuenca.

Por último, a fin de validar la funcionalidad del diseño propuesto con la red de nodos sensores del IERSE, se realiza una comparativa de estos sobre el mapa de cobertura propuesto. Se puede ver que las ubicaciones actuales están cubiertas por las áreas de cobertura y que la propuesta se basa en aumentar puntos de monitoreo.



Figura 22. Mapa comparativo de nodos IERSE con la propuesta actual.

La implementación de los *Gateway* LoRa y sensores requieren energía eléctrica; además de necesitar un enlace de telecomunicaciones físico o inalámbrico para el *Gateway* y así transmitir la información adquirida por los sensores hacia el servidor LoRa por medio de Internet.

Así mismo y como se fue observado en las pruebas de campo, los concentradores siempre necesitan estar instalados en un punto alto para tener la mayor visibilidad y despeje en el trayecto del enlace LoRa con los sensores. La altura de los sensores LoRa dependerá tanto de sus características constructivas como de las restricciones para la adquisición de las variables ambientales determinadas por el fabricante o el desarrollador.

Por este motivo se propone instalar los *Gateway* y sensores en el siguiente orden:

- Postes pertenecientes a la Empresa Eléctrica Centro Sur o ECU911.
- Adosamientos en inmuebles públicos.
- Adosamientos en inmuebles particulares.

Se debe considerar que el uso de postes de la Empresa Eléctrica Centro Sur tiene un costo mensual, a menos que se pueda realizar un convenio entre la Universidad del Azuay y la Empresa Eléctrica.

IV. CONCLUSIONES

Se efectuaron pruebas simuladas y de campo con nodos referenciales, ubicados en 104 puntos estratégicos de la ciudad de Cuenca, y un *Gateway* colocado en el edificio de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay. Dicho análisis demuestra que los resultados prácticos difieren de los teóricos, por lo que un análisis basado exclusivamente en los perfiles geográficos no es suficiente. Tras realizar las pruebas de cobertura, se obtuvo una buena conexión entre los nodos a 1 km con respecto al punto *Gateway*, pero es necesario que en el trayecto no existan muchos obstáculos. En caso de no existir una línea de vista, y ante la presencia de varios obstáculos, la distancia de cobertura se reduce a 600 m.

Con base en estas consideraciones, se proyecta un diseño para una red LoRa en la ciudad de Cuenca, para lo que se emplea como base los puntos de mayor flujo de las rutas del transporte público, además de abarcar áreas y puntos de mayor confluencia de personas. En total, fueron definidos 73 nodos y 26 equipos de *Gateway* o concentradores.

Finalmente, se formula una comparativa entre el diseño propuesto y las ubicaciones de la red de nodos sensores administradas por el IERSE. Se obtiene que, con el diseño propuesto, las áreas de interés deberían tener cobertura. Por lo que, se concluye que la red propuesta es factible para reemplazar la red actualmente establecida por el IERSE, tanto en costos como en conexión con los nodos finales. No obstante, el despliegue de ésta incluye mayor esfuerzo de logística. Además, se recomienda considerar la altura del sensor, así como el punto seleccionado para la ubicación de del *Gateway* para a futuro instalar sensores en puntos viables a una distancia de 600m.

Como trabajo futuro, se plantea la adquisición de tarjetas electrónicas LoRa, para que sean incorporadas en las estaciones de monitoreo que en la actualidad se encuentran en funcionamiento. Con esto, será posible realizar un análisis más profundo de la cobertura ofrecida por la red que se propone en este estudio, ya que factores climáticos podrían llegar a reducir las áreas de cobertura, por lo que, es importante validar la transmisión de paquetes por períodos de tiempo largos y verificar la estabilidad de la red propuesta.

V. REFERENCIAS

- [1] B. Chaudhari, M. Zennaro y S. Borkar, «Tecnologías LPWAN: características de aplicaciones emergentes, requisitos y consideraciones de diseño,» *Future Internet*, 2020.

- [2] R. Kalyan, R. Varshith, K. Jitesh y S. Ashif, «LPWAN TECHNOLOGIES FOR IOT DEPLOYMENT,» 2020.
- [3] D. Olatinwo, A. Mahfouz y G. Hancke, «Una encuesta sobre tecnologías LPWAN en WBAN para monitoreo remoto de atención médica,» 2019.
- [4] M. Cárdenas, D. González y C. Retamal, «Protocolo LoRa para implementación IoT en smart cities.,» 2018.
- [5] JDL Solutions, «“tecnología”,» LORA.4 Modulación de largo alcance, 2022.
- [6] J. Andreu, «A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies,» EDITEX, 2017.
- [7] The Things Stack, «Arquitectura LoRaWAN,» 2023.
- [8] A. Villarreal, «Rediseño de la red de datos de la empresa Asistecom para integrar telefonía IP con calidad de servicio.,» 2019.
- [9] N. Aakvaag y J. Frey, «Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial,» 2016.
- [10] C. González, F. Arévalo y J. Gutiérrez, «Análisis de seguridad en redes LPWAN para dispositivos IoT,» 2019.
- [11] Z. Sun, H. Yang, K. Liu, Z. Yin, Z. Li y W. Xu, «Recent Advances in LoRa: A Comprehensive Survey,» 2020.
- [12] J. Shin, J. Lim, D. Kim y J. Kim, «Análisis de rendimiento de enlaces de LoRa para la recopilación de información en tiempo real en condiciones marítimas,» 2018.
- [13] Y. Li, X. Cheng, Y. Cao, D. Wang y L. Yang, «Design of Air Quality Monitoring System Based on N-IoT,» 2019.
- [14] T. Petric, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain y A. Pelov, «Mediciones, rendimiento y análisis de LoRa FABIAN, una implementación real de LPWAN,» 2016.
- [15] E. Carrasco, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SERVIDOR DE ADMINISTRACIÓN Y GESTIÓN DE UNA RED LORAWAN E INTEGRACIÓN CON AMAZON WEB SERVICE,» 2020.
- [16] B. Sandoya, «Sistema de monitoreo inteligente de consumo de energía eléctrica (smart metering) con tecnología LoRa para hogares en la ciudad de Ambato,» 2021.
- [17] J. Álvarez, «Desarrollo e implementación de una red inalámbrica de bajo consumo para la prevención y detección de incendios,» 2018.
- [18] A. Heredia y P. Lucero, «Diseño e implementación de un ared inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPEC de arquitectura unificada,» Cuenca, 2021.
- [19] H. Forero y D. Camberos, «Desarrollo de una red punto a punto con tecnología LoRa y servidor web,» 2020.
- [20] ARCOTEL, «Resolución ARCOTEL -2018-,» 2018.
- [21] M Electronics, «MicroChip technology,» Microchip technology, USA, 2022.