



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

INSTITUTO DE POSTGRADO



Instituto de
Posgrado

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE
RADIO IoT, PARA ESCENARIOS URBANO Y RURAL, POR MEDIO DE MODELOS
MATEMÁTICOS.”

Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de
Magíster en Telecomunicaciones

AUTOR(A):

ALEJANDRA MABEL PINTO ERAZO

DIRECTOR:

MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO

IBARRA - ECUADOR

2020

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Luis Edilberto Suárez Zambrano**, certifico que la estudiante **Alejandra Mabel Pinto Erazo** con Cédula N° **040129976-3** ha elaborado bajo mi tutoría la sustentación del trabajo de grado titulado: **“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE RADIO IoT, PARA ESCENARIOS URBANO Y RURAL, POR MEDIO DE MODELOS MATEMÁTICOS.”**

Este trabajo se sujeta a las normas y metodologías dispuestas en el reglamento del título a obtener, por lo tanto, autorizo la presentación a la sustentación para la calificación respectiva.

Ibarra, 20 de noviembre del 2020.



Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano

Tutor

CI: 100230429-1

APROBACION DEL TRIBUNAL

El presente trabajo de grado titulado “**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE RADIO IoT, PARA ESCENARIOS URBANO Y RURAL, POR MEDIO DE MODELOS MATEMÁTICOS**”, constituye requisito previo para la obtención del título de Magister en Telecomunicaciones del Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica del Norte.

Autora: Alejandra Mabel Pinto Erazo

Trabajo de grado, aprobado en nombre de la Universidad Técnica del Norte, por el siguiente jurado: Msc. Edwin Marcelo Jurado Ávila, Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano, Msc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez, a los 10 días del mes de diciembre del 2020.



Msc. Edwin Marcelo Jurado Ávila

Presidente del Tribunal



Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano

Tutor



Msc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

Asesor



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
INSTITUTO DE POSGRADO
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD	0401299763
APELLIDOS Y NOMBRES	Pinto Erazo Alejandra Mabel
DIRECCIÓN	Ciudadela del Chófer. Calle Honduras.
EMAIL	ampinto@utn.edu.ec
TELÉFONO MÓVIL	0996392999

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	Desarrollo de una metodología de análisis de tecnologías de radio IoT, para escenarios urbano y rural, por medio de modelos matemáticos.
AUTORA	Alejandra Mabel Pinto Erazo
FECHA: DD/MM/AAAA	20 de noviembre del 2020
PROGRAMA DE POSGRADO	Maestría en Telecomunicaciones
TÍTULO POR EL QUE OPTA	Magister en Telecomunicaciones
TUTOR	Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano

2. CONSTANCIAS

La autora Alejandra Mabel Pinto Erazo, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de noviembre del año 2020.



Alejandra Mabel Pinto Erazo

CI: 040129976-3

DEDICATORIA

Dedico este Proyecto a mis padres que siempre tienen las palabras adecuadas para motivar, subir el ánimo y terminar cada objetivo propuesto a satisfacción. A mi ñaña, que es la ocurrida del hogar y no la detiene nada, siempre va dando el mejor ejemplo en casa. A la pequeña del hogar que con su ternura y sus inocentes palabras siempre saca una sonrisa a su tía querida.

RECONOCIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos al Msc. Luis Suárez por aceptar y guiar mi proyecto de titulación, por tener la paciencia para explicar cada paso que debía realizar, por enseñarme a validar cada comportamiento con fundamentos y además convertirse en un buen amigo.

Al Msc. Fabián Cuzme por compartir sus conocimientos acertados durante el desarrollo del proyecto de titulación y atender oportunamente mis inquietudes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	2
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	3
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	4
DEDICATORIA	6
RECONOCIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE ECUACIONES	12
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
CAPITULO I.....	15
EL PROBLEMA	15
Problema de investigación	16
Objetivos de la investigación	18
<i>Objetivo general</i>	18
<i>Objetivos específicos</i>	18
Justificación	19
CAPITULO II	23
MARCO REFERENCIAL.....	23
Tecnologías LPWAN	25
Tecnologías que usan banda de espectro de uso común	25
Sigfox	25
Arquitectura	26
Características técnicas	27
Estándar	29
Protocolos de comunicación.....	29
Protocolo de enlace	30
LoRa	30
Arquitectura	31
Protocolo de comunicación	32
Bandas de operación	33
Clasificación mediante clases	34
Características adicionales	35
Tecnología que utiliza banda de espectro de uso privado	36
NB-IoT	36

Características técnicas	37
Arquitectura	38
Estándar	39
Modos de funcionamiento	41
Protocolo de comunicación	41
Comparativa de Tecnologías.	43
Capacidad	43
Cobertura	44
Consumo energético.....	45
Costo	45
Seguridad.....	46
Resumen de características	47
Aplicaciones de IoT	48
Telemedicina.	48
Agricultura inteligente	50
Edificio inteligente.....	50
Industria y logística.....	50
Aplicaciones en los gobiernos electrónicos.....	51
Protección de datos personales	52
Teleeducación	52
Teletrabajo.....	53
Referentes legales.....	53
ITU.....	53
Ministerio de Telecomunicaciones	54
Recomendación R-1238-10	55
Constitución Ecuador	55
Plan Nacional de Telecomunicaciones.....	56
Plan de la Sociedad de la Información y del Conocimiento 2018 – 2021	56
Tecnología LPWAN en Latinoamérica.....	57
Aplicaciones en escenario Rural.....	59
Aplicaciones en escenario Urbano.....	60
Aplicaciones en escenario de interiores	60
CAPITULO III.....	61
MARCO METODOLÓGICO	61
Descripción del área de estudio	61
Tipo de investigación.	62
Investigación documental.....	63
Guía PMBOOK	63

Fase de planificación.....	64
Fase de ejecución.....	67
Fase de control.....	67
Fase de cierre.....	68
Investigación experimental.....	68
Variables.....	69
Eventos de simulación.....	69
Toma de decisiones.....	69
Procedimiento de investigación.....	70
Definición de escenarios.....	70
Métrica de cálculo.....	72
Escenarios urbanos, suburbanos.....	72
Escenario rural.....	77
Comparativa de categorías.....	79
Escenarios interiores.....	81
Modelos de propagación.....	82
Parametrización de escenarios.....	87
Pérdida por acoplamiento.....	89
CAPITULO IV.....	91
SIMULACIÓN, RESULTADOS Y PROPUESTA.....	91
Interfaz Home.....	92
Interfaz Exteriores.....	93
Interfaz Interiores.....	93
Resultados Exteriores.....	96
LoRa.....	96
NB-IoT.....	97
Sigfox.....	98
Resultados Interiores.....	100
LoRa.....	100
NB-IoT.....	101
Sigfox.....	102
Resultados Finales.....	103
Manual de procedimientos.....	105
CONCLUSIONES.....	108
RECOMENDACIONES.....	111
Bibliografía.....	112
Anexos.....	115
Anexo 1 – Casos de uso UTN.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tecnologías IoT.....	19
Figura 2 Red de área local, red de área amplia de baja potencia, red celular.....	24
Figura 3 Esquema arquitectura Sigfox	27
Figura 4 Comparativa Sigfox y modelo de Referencia OSI	29
Figura 5 Arquitectura de LoRa	32
Figura 6 <i>Protocolo de comunicación LoRaWAN</i>	32
Figura 7 Ventanas de recepción LoRa.....	34
Figura 8 Arquitectura NB-IoT	39
Figura 9 Modos de funcionamiento: Stand-Alone, In-band, Guard-band.....	41
Figura 10 Pila de protocolo LwM2M v1.1	42
Figura 11 Gráfico Comparativo entre Sigfox, LoRa, NB-IoT.....	48
Figura 12 Ejemplo de aplicación de la tecnología LoRa en una red de sistema de salud	49
Figura 13 Ranking de países que adoptan tecnologías inalámbricas	59
Figura 14 Fases de PMBOOK	64
Figura 15 Diagrama de flujo de actividades a desarrollar	65
Figura 16 Parámetros de planificación	66
Figura 17 Fases de investigación científica	69
Figura 18 Actividades para proceso de simulación.....	70
Figura 19 Escenario típico con línea de vista	71
Figura 20 Escenario sin línea de vista en ambiente fábrica.....	71
Figura 21 Sobrecarga respecto a MCL.....	76
Figura 22 Interfaz Home.....	92
Figura 23 Diagrama de Flujo de Interfaz de Exteriores	94
Figura 24 Diagrama de Flujo Interiores	95
Figura 25 Enlace Exterior LoRa	97
Figura 26 Enlace Exterior NB-IoT.....	98
Figura 27 Enlace Exterior Sigfox.....	99
Figura 28 Enlace Interior Lora.....	101
Figura 29 Enlace Interior NB-IoT	102
Figura 30 Enlace interior Sigfox.....	103
Figura 31 Portada de Manual de procedimientos.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Protocolos de enlace de largo alcance Sigfox	30
Tabla 2 Frecuencias de trabajo LoRa / LoRaWAN.....	33
Tabla 3 Estándares eMTC, NB-IoT y EC-GSM-IoT	40
Tabla 4 Capacidad en tecnologías IoT.....	43
Tabla 5 Limitaciones de mensajes en tecnologías IoT	43
Tabla 6 Cobertura de tecnologías IoT	44
Tabla 7 Consumo energético de NB-IoT, Sigfox y LoRa	45
Tabla 8 Costo módulo tecnologías IoT.....	46
Tabla 9 Seguridad en tecnologías IoT	46
Tabla 10 Descripción de parámetros del proyecto de titulación	66
Tabla 11 Parámetros de ejecución guía PMBOOK.....	67
Tabla 12 Fase de control - PMBOOK	67
Tabla 13 MCL de las tecnologías LPWAN	72
Tabla 14 Valores de MCL de LoRa y NB-IoT	73
Tabla 15 Comparación requerimientos LoRa y NB-IoT	79
Tabla 16 Coeficientes de pérdida de potencia.....	87
Tabla 17 Factor de pérdida por penetración del suelo.....	88
Tabla 18 Coeficientes de pérdida de potencia den NB-IoT	88
Tabla 19 Factor de pérdida de penetración NB-IoT.....	89
Tabla 20 Valores de MCL soportadas	89
Tabla 21 Valores iniciales de simulación.	92
Tabla 22 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en exteriores.	96
Tabla 23 Rango de frecuencia para LoRa, Sigfox, NB-IoT.....	96
Tabla 24 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en interiores.....	100
Tabla 25 Resultados de las coberturas tanto en interiores como en exteriores.....	104

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Cálculo MCL.....	73
Ecuación 2 Pérdida de propagación.....	82
Ecuación 3 Ecuación modelo de propagación Okumura Hata.....	84
Ecuación 4 Ecuación para ciudad pequeña.....	84
Ecuación 5 Modelo para ciudad grande con frecuencia pequeña	84
Ecuación 6 Modelo para ciudad grande con frecuencia mayor	85
Ecuación 7 Modificación estándar de fórmula de propagación	85
Ecuación 8 Pérdida en área rural.....	85
Ecuación 9 Pérdida de transmisión básica en una distancia dada.	86

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

INSTITUTO DE POSGRADO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE
RADIO IoT, PARA ESCENARIOS URBANO Y RURAL, POR MEDIO DE
MODELOS MATEMÁTICOS”.**

Autor: Ing. Alejandra Mabel Pinto Erazo

Tutor: Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano

Año: 2020

RESUMEN

En términos de conectividad inalámbrica, existe la clasificación denominada LPWAN (Low Power Wide Area Network), como una red de área amplia de baja potencia, que conectada a redes de sensores comunica a baja potencia con bajo consumo de batería. Los antecedentes expuestos sobre las tecnologías en este rango son LoRa y Sigfox como líderes del mercado en espectro libre, mientras que Narrowband IoT lidera tomando parte del espectro licenciado. Adicionalmente, se compara características técnicas y aplicaciones en contexto telesalud, teleeducación, agricultura, industria, otros. Se identifican casos de usos de la tecnología LPWAN en Latinoamérica. También se describe la regulación nacional e internacional dado que son tecnologías nuevas y poco desplegadas en el entorno. La estadística revela que con el contexto pandemia en el 2020, varios sectores de las telecomunicaciones iniciaron su despliegue de este tipo de redes, pero al ser necesario el despliegue de una infraestructura relativamente costosa, varios expertos prefieren realizar inicialmente simulaciones de parámetros de operación y verificar la viabilidad de una implementación. En este sentido, se considera que la relación cobertura & pérdida de propagación debe ser alta, para lo que existen modelos matemáticos con los que es posible predecir el comportamiento en determinado escenario así: urbano, suburbano y rural; el que más se adapta a cualquier escenario y sin tanto requerimiento es el de Okumura-Hata, que plantea un rango de estudio similar al que trabajan las tecnologías descritas. Además, la ITU emite recomendaciones para Propagación de señales como el documento R-1238-10 que describe el comportamiento de una tecnología en escenarios como oficinas y fábricas. Los requerimientos para realizar el cálculo de propagación en los escenarios propuestos tanto en el modelo matemático como la Recomendación de la ITU solicitan identificar las características y restricciones así: frecuencia, MCL, área de cobertura máxima, obstáculos. Una vez codificado, el análisis de cada resultado emite valores de cobertura y pérdidas de propagación que permiten identificar la mejor tecnología (Lora, Sigfox, Narrowband-IoT) para cada escenario (exterior e interior). Finalmente, se genera el manual de procedimientos como guía para estudiantes que usan Laboratorio de Electrónica.

Palabras clave: *LWPAN, LoRa, NB-IoT-Cobertura, Propagación, Okumura Hata.*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

INSTITUTO DE POSGRADO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE
RADIO IoT, PARA ESCENARIOS URBANO Y RURAL, POR MEDIO DE
MODELOS MATEMÁTICOS”.**

Autor: Ing. Alejandra Mabel Pinto Erazo

Tutor: Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano

Date: 2020

ABSTRACT

In terms of wireless connectivity, there is the classification called LPWAN (Low Power Wide Area Network), as a low power wide area network, which, connected to sensor networks, communicates at low power with low battery consumption. The exposed antecedents on the technologies in this range are LoRa and Sigfox as market leaders in free spectrum, while Narrowband IoT leads taking part of the licensed spectrum. In addition, technical characteristics and applications are compared in telehealth, tele-education, agriculture, industry, and others. Cases of use of LPWAN technology in Latin America are identified. National and international regulations are also described since they are new technologies and little deployed in the environment. The statistics reveal that with the pandemic context in 2020, several telecommunications sectors began their deployment of this type of networks, but since it was necessary to deploy a relatively expensive infrastructure, several experts prefer to carry out first simulations of operating parameters and verify the feasibility of an implementation. In this sense, it is considered that the coverage and propagation loss relationship should be high, for which there are mathematical models with which it is possible to predict behavior in a certain scenario as follows: urban, sub urban and rural; the one that best adapts to any scenario and without so much requirement is Okumura-Hata, which proposes a range of study simulating the one used by the technologies described. In addition, the ITU issues recommendations for Propagation of signals such as document R-1238-10 that describe the behavior of a technology in settings such as offices and factories. The requirements to perform the propagation calculation in the scenarios proposed both in the mathematical model and in the ITU Recommendation request to identify the characteristics and restrictions as follows: frequency, MCL, maximum coverage area, obstacles. Once coded, the analysis of each result emits coverage values and propagation losses that allow to identify the best technology (Lora, Sigfox, Narrowband-IoT) for each scenario (exterior and interior). Finally, the procedures manual is generated as a guide for students who use the Electronics Laboratory.

Keywords: *LWPAN, LoRa, NB-IoT, coverage, signal propagation, Okumura Hata.*

CAPITULO I

EL PROBLEMA

En el presente capítulo se detalla el problema de investigación, los objetivos y la justificación de estudio.

El crecimiento del mercado de Internet de las cosas (IoT¹), transforma a diario el uso de varias tecnologías. En el artículo de (Telefónica. María Cascajo Sastre, 2018), se estima que el gasto en IoT en aplicaciones para el desarrollo de ciudades, industrias y hogares inteligentes tendría una tasa anual de crecimiento del 13,6% entre 2017 y 2022.

El número de dispositivos conectados sigue creciendo hasta los 20.400 millones en el 2020, año en el cual el 95% de los productos nuevos se incorporarán. (Cascajo, 2018). Así mismo, Business Insider prevé que, entre ciudadanos, instituciones y gobiernos, se tendrá más de 40.000 millones de dispositivos conectados en 2023. (Business Insider, 2018).

La crisis en todos los sentidos generada a partir de la pandemia del COVID-19² potenció la utilización de tecnologías emergentes en campos como telemedicina, teleeducación, teletrabajo, energía, ciudades inteligentes, agricultura, automatización de edificios, industria IoT, control de activos, cadenas de suministros, gestión de transporte y más (FRONTIERSIN, 2020); de tal manera que varios proveedores se posicionaron y otros se fortalecieron, elevando sus acciones y generando movimiento. Los escenarios están planteados, pero los profesionales del área tienen el reto de hacer del uso de las tecnologías y sus protocolos más eficientes y transparentes al consumidor, gobierno y empresas. Es así como una vez más se confirma que las tecnologías y la gestión de la información mueven la economía.

¹ Internet of Things – Internet de las cosas

² COVID-19 – Corona Virus Disease 2019

Las tecnologías denominadas de baja potencia y largo alcance cobran fuerza, para satisfacer los servicios antes mencionados; es por eso por lo que se analiza los posibles problemas de su uso para determinar las mejores condiciones. Se considera que, el antecedente presentado sobre IoT sugiere que hay un presente y futuro para realizar varios estudios de infraestructura, protocolos, estándares, casos de uso, y en cierta manera presentar propuestas para lo que define (The IoT Forecast Book, 2018), como consumidores IoT, experimentales IoT, gobiernos IoT, empresa IoT.

Problema de investigación

En el Libro The IoT Forecast, los autores afirman el siguiente enunciado: “*La conexión a Internet y el equipamiento con sensores, impulsan gran parte a la economía basada en datos y se reduce la brecha entre el mundo físico y el digital.*” (The IoT Forecast Book, 2018). Es una afirmación que tiene un estudio detrás para que todo sea posible, desde el estudio de infraestructuras hasta la convergencia de varias tecnologías de comunicación de radio.

De esta manera, con el apareamiento de cada tecnología nueva empiezan también algunos inconvenientes tecnológicos. Surgen las tecnologías que puedan transmitir con baja tasa de datos y largas distancias, como son las Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)³; que como pueden ser útiles en varias aplicaciones, también generan problemas de cobertura o latencia en otros casos, según el ambiente de aplicación.

(Oracle, 2018) define algunas características de los dispositivos de IoT, así:

- Conectividad de alta velocidad.
- Disponibilidad.

³ LPWAN - Low-Power Wide-Area Network – Red de área amplia y baja potencia.

- Análisis de procesos.
- Integración de servicios.

Como se observa, las dos primeras características son fundamentales para IoT, puesto que la interconexión de sensores a través de redes fijas e inalámbricas en tiempo real es la clave; sin embargo, existen infinitas aplicaciones y casos de uso en ciudades inteligentes, industria, logística, energía, agricultura, ganadería y otros, que significan un reto tecnológico, con beneficio a la sociedad y con tendencia medioambiental. (The IoT Forecast Book, 2018)

Las tecnologías Wireless Personal Area Network (WPAN)⁴, como WiFi⁵ o Bluetooth, son utilizadas para proporcionar conectividad a dispositivos IoT, presentando un gran nivel de implantación; sin embargo, en algunos escenarios estas tecnologías presentan limitaciones con respecto a su alcance porque son de tan solo unas decenas de metros; o a su consumo, demasiado elevado como para permitir una larga duración de la batería en aquellos casos en los que no existe la posibilidad de emplear alimentación cableada. (Tornero Viñas & Pérez Roca, 2018)

Otro de sus inconvenientes es el uso de las bandas ISM⁶ (Industrial, Scientific and Medical) del espectro radioeléctrico como WiFi, Bluetooth, lo que implica que deben convivir y compartir este recurso con otras tecnologías y dispositivos. (Tornero Viñas & Pérez Roca, 2018). Se considera muy importante este ítem, por la relación que tiene con las aplicaciones de campos delicados como ciencia, salud e industria, todos estos aplicados a entornos tanto urbanos o rurales como externos sin interferencias o internos con muchos inconvenientes; para efecto de estudio podría ser ambientes como el Centro de estudios de la Universidad Técnica del Norte y sus distintos campus y granjas; así como la interrelación con el teletrabajo y

⁴ Wireless Personal Area Network

⁵ WiFi – Wireless fidelity

⁶ ISM – Industrial, scientific, medical

telestudio que se está atravesando; todo con el propósito de mejorar la gestión y rapidez de respuestas. Después de analizar a nivel general los inconvenientes se hace necesario investigar varias publicaciones relacionadas y analizar algunos escenarios básicos que contemple LWPAN.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Desarrollar una metodología orientada al análisis de tecnologías de radio IoT, para escenarios urbano y rural, por medio de modelos matemáticos.

Objetivos específicos

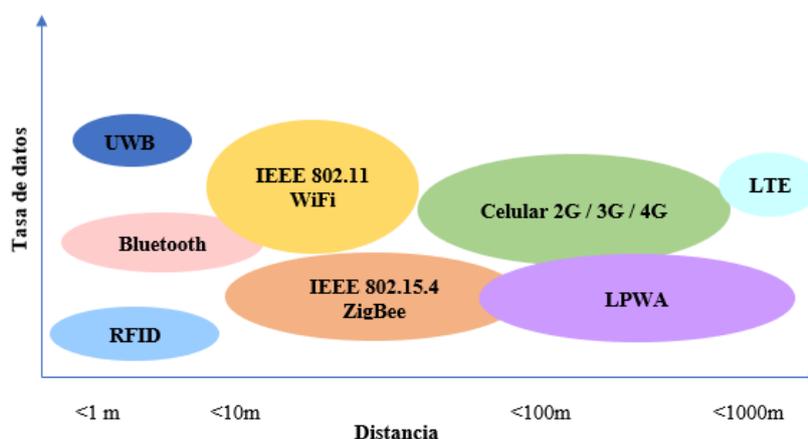
- Analizar las características, estándares, normativas y protocolos de las redes LPWA, propuestas por el 3GPP y las que se desenvuelven dentro del espectro compartido.
- Desarrollar una comparativa de las tecnologías LPWAN con mayor presencia en el mercado por medio de una matriz cualitativa de valoración de criterios.
- Identificar un caso de uso y las condiciones que determinan un ambiente urbano y rural por recomendaciones de la ITU, en el que se aplique las tecnologías estudiadas a través de un esquema de adquisición de datos.
- Proponer un modelo matemático existente para simulación de escenarios urbano y rural en el que se evidencie la cobertura de su despliegue.
- Generar un manual de procedimientos generales con fines académicos para el despliegue de WPAN en escenarios urbano y rural, orientado a trabajos académicos y de investigación futuros en Instituciones de Educación Superior.

Justificación

Internet de las cosas (IoT) consiste en una serie de redes con diferentes objetivos de diseño, que se pueden desglosar según su cobertura y tasa de transmisión de datos, como se muestra en la

Figura 1.

Figura 1 *Tecnologías IoT*



Nota: El gráfico representa cada tecnología que contempla IoT, con relación al alcance y la tasa de datos permitida. Tomado de (PANDORAFMS, 2018)

Las tecnologías LPWAN (red de área amplia de baja potencia) están diseñadas para una distancia de transmisión de más de un kilómetro, con bajo consumo de energía y transmisión de datos en banda estrecha. Todo ello con un bajo costo de comunicación. (PANDORAFMS, 2018).

El equipo de colaboradores de asociaciones de telecomunicaciones 3GPP⁷, sugiere los estándares de referencia para el sector de las telecomunicaciones en su Release 14 presenta NarrowBand IoT y LTE-M, que operan en bandas de frecuencia bajo licencia 3G/4G y serán

⁷ 3GPP – 3rd Generation partnership Project – Proyecto Asociación de Tercera Generación.

explotadas por las operadoras tradicionales de telefonía; y por otro lado tecnologías que utilizan la banda de espectro no licenciada como LoRa. (3GPP, 2017)

Estas tecnologías ofrecen alcances de varios kilómetros y consumos reducidos, a costa de proporcionar tasas binarias bastante limitadas. Además, debido a que utilizan bandas libres de radiofrecuencia, al igual que las tecnologías WPAN, son susceptibles a interferencias que pueden afectar severamente a sus prestaciones. (3GPP, 2017).

NB-IoT⁸ encaja en banda licenciada. Esta tecnología usa bandas del espectro licenciadas, por lo que no existen interferencias con otras tecnologías, haciendo que la robustez de las comunicaciones sea mucho mayor y no dependa del número de dispositivos en las proximidades. Además, muchas de las bandas de frecuencia reservadas para NB-IoT están en el rango de los 700 y 800 MHz, lo que facilita la penetración en edificios y sótanos, haciendo que la tecnología pueda operar en un mayor número de escenarios que las redes WPA y LPWA. (Tornero Viñas & Pérez Roca, 2018)

NB-IoT se convierte en la principal solución de redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) a criterio del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), reemplazando las propuestas NB-LTE y NB-CIoT (Cellular IoT), siguiendo un proceso de estandarización que involucra empresas de desarrollo de estándares de telecomunicaciones, conocidas como “Organization Partners”, proveyendo a sus miembros insumos para definir tecnologías inalámbricas.(Díaz Zayas et al., 2017)

Una característica de NB-IoT es su bajo consumo de energía, 10 años de vida útil y un costo aproximado de infraestructura IoT NB-IoT de \$227 000 000, que contempla el costo de

⁸ NB-IoT – NarrowBand IoT

backhaul y estaciones LTE, además conexiones de 50000 terminales por celda y cobertura amplia. (Torneró Viñas & Pérez Roca, 2018)

En otra línea de investigación, LoRa, que debe ser estudiada porque se trata de una tecnología con protocolo abierto LoRa WAN; una ventaja para que varios desarrolladores y productos de mercado tomen esta tecnología con base para proyectos futuros, mejorando así la competitividad y reduciendo los precios de mercado. Además, es una tecnología con múltiples ventajas para el desarrollo de redes IoT. Algunas de estas ventajas son su escalabilidad, su bajo consumo de energía, fácil instalación, etc. (AlFaIoT, 2018)

Son tecnologías nuevas que se encuentran a la vanguardia y compiten por su despliegue a gran escala, sin embargo, generan inconvenientes de acuerdo con los escenarios en que se aplican y el comportamiento en ambientes reales, conectando sensores, actuadores, medidores es muy diferentes; por lo que surge la necesidad de plantear un entorno urbano y rural predefinido por Recomendación de la ITU bajo algunos parámetros que se estudiarán en el desarrollo de este proyecto.

También hay que considerar factores económicos; para lo que, la empresa SAVTEC, calcula un valor aproximado de implementación de infraestructura LoRa, considerando costos de backhaul como torres, paneles solares, baterías, estación base; además de estaciones finales LoRa con un valor de \$18 000 000.

El año 2020, trajo consigo, la situación denominada COVID-19, misma que para el área tecnología implica un reto de generar comunicaciones ultra fiable de baja latencia, por ejemplo para tele cirugía o cirugía robótica; así mismo trabajos e investigaciones sobre inteligencia artificial y redes de comunicación impulsadas por el aprendizaje automático para predicción de brotes, detección temprana, instrucciones de cuarentena de emergencia; también se generan espacios para comunicaciones moleculares y sensores bio inspirados para aplicaciones de

pandemia relacionadas con la salud electrónica para el rastreo de contactos durante la pandemia, tecnologías para el rastreo de contactos, seguimiento y monitoreo. Igualmente se da apertura a plataformas aéreas como drones para redes de acceso y detección de redes temporales, así como comunicaciones por satélite para conectividad global, enfoques de optimización para aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada, de tal manera que se evite el contacto físico en cualquier escenario. Y, resuena nuevamente el despliegue rápido de nuevos servicios en bandas de espectro de radio de banda ancha con casos de uso de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) y aplicaciones para monitoreo de condiciones remotas.

Una vez expuestas varias consideraciones, el presente trabajo de titulación, analiza y compara las tecnologías LPWAN que lideran el mercado; así como el presentar escenarios aplicables y analizar un modelo matemático existente que se acople a los escenarios mencionados, de tal manera que simulados sea posible valorar parámetros de cobertura y pérdidas, mediante el App Designer de Matlab. Se propone este software de simulación puesto que la Universidad cuenta con las licencias para tener mejor provecho de sus bondades.

Posteriormente se compara ventajas y desventajas obtenidas a través de la simulación en los escenarios propuestos, para determinar la mejor tecnología según el ambiente. Finalmente se presenta un manual de procedimientos con fines académicos; mismo que sirve para continuar el análisis de escenarios, tecnologías y rangos de frecuencia. Conjuntamente, el proyecto de titulación menciona el método de trabajo de PMI para desarrollarlo, adapta los parámetros de la Guía de PMBOOK⁹ y los define conforme al alcance propuesto.

⁹ PMBOOK – Project management body of knowledge

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

Para comprender el funcionamiento de las redes de radio IoT, se conciben referentes teóricos en los que se detalla características, protocolos, estándares y casos de uso de las tecnologías PWWAN; además, la revisan modelos matemáticos de propagación que se acoplen en exteriores e interiores; así como referentes legales nacionales e internaciones que consideran importante el despliegue de estas tecnologías. El primer referente legal para analizar es el de ITU¹⁰ emitido en su última versión de noviembre 2019, porque manifiesta las recomendaciones de cada una de las tecnologías y sus modos de propagación según los escenarios de despliegue; luego está el Proyecto 3GPP que explica en su Release 14 sobre la red en banda de espectro privado desplegada sobre una infraestructura de comunicaciones ya planificada y modelos de propagación en exteriores e interiores de acuerdo con los parámetros de ingreso. En el ámbito nacional, se analiza la Constitución de la República como Carta Fundamental, el Plan Nacional de Telecomunicaciones y el Plan de la Sociedad de la Información y del Conocimiento 2018 – 2021, que generan propuestas de conectividad en todo el territorio y que sustentan el presente proyecto de titulación. Además se indaga sobre lo que los organismos MINTEL¹¹ y ARCOTEL¹² manifiestan sobre las LPWAN.

En términos de conectividad inalámbrica, surgen dispositivos que, inicialmente adoptaron el SIM para envío de información pero con alto costo y gran consumo de energía; posteriormente surgen las tecnologías WPAN que satisfacen el envío de datos con bajo consumo de energía, baja velocidad pero con el inconveniente de cortas distancias en escala de

¹⁰ ITU – International Telecommunications Union – Unión Internacional de Telecomunicaciones

¹¹ MINTEL – Ministerio de Telecomunicaciones.

¹² ARCOTEL – Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

metros. Con el interés por desarrollar tecnologías de mayor alcance en escala de kilómetros surge las LPWAN, mismas que logran trabajar con menor consumo de energía, costo bajo en cuanto a infraestructura y transmisión atravesando obstáculos, y propagándose en escenarios interiores. La **Figura 2** valida lo expuesto en el párrafo de introducción.

Figura 2 Red de área local, red de área amplia de baja potencia, red celular.

	Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
	40%	45%	15%
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
	 		   

Nota: Se muestra la relación de las tecnologías existentes en el marco estadístico de uso, las ventajas y desventajas; así como ejemplos de sus redes.

En la actualidad, la tendencia de comunicaciones IoT está sobre las tecnologías NarrowBand-IoT en la banda de espectro licenciado, Sigfox y LoRa en la banda de espectro libre. NarrowBand-IoT que usa una red de telecomunicaciones de carácter privado e infraestructura en lugares ya dispuestos; mientras que, LoRa es un sistema desarrollado por LoRa Alliance que agrupa a operadores de comunicaciones y fabricantes para desarrollar estándares libres que faciliten la interconexión de equipamiento sin importar su marca; siempre que dispositivos y sensores puedan conectarse a la red generando información, con iniciativas planteadas en otros sitios del mundo como espacios de teletrabajo, asistencia remota a pacientes, industrias IoT, cadenas de suministros, gestión eficiente del transporte, comunicaciones inalámbricas a largas distancias entre sus campus; siendo un referente para el presente proyecto de investigación.

Tecnologías LPWAN

Hay opciones para transmitir datos entre sensores IoT y aplicaciones web/móviles, a través de una plataforma IoT. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas. LPWAN propone sensores que sean baratos, de tamaños pequeños, que puedan operar con batería (autonomía) y que optimice la comunicación a velocidades de datos muy bajas. Las empresas que cumplen con las características mencionadas trabajan sin necesidad de licencia y están liderando el mercado, estas son: Sigfox con su red de dispositivos del mismo nombre y Semtec con su red LoRa / LoRa WAN; además empieza a destacar NB-IoT en la banda de espectro licenciado como evolución de 4G(LTE) basada en la infraestructura ya marcada.

Tecnologías que usan banda de espectro de uso común

Son tecnologías inalámbricas que desarrollan su infraestructura y protocolos en un rango de operación destinado para Industria, Ciencia o Medicina, que no cuenta con regulación rígida pero es orientada por los organismos fabricantes o Grupos de Telecomunicaciones como la ITU.

Sigfox

Sigfox es un operador de red LPWAN que ofrece una solución de conectividad de IoT de extremo a extremo basada en sus tecnologías patentadas. Sigfox implementa sus estaciones base patentadas equipadas con radios cognitivas definidas por software y las conecta a los servidores back-end mediante una red basada en IP. Los dispositivos finales conectados a estas estaciones base utilizan modulación y demodulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK¹³) en una portadora de banda ISM sub-GHZ de banda ultra estrecha (100 Hz). Sigfox

¹³ BPSK – Modulación por desplazamiento de 2 símbolos.

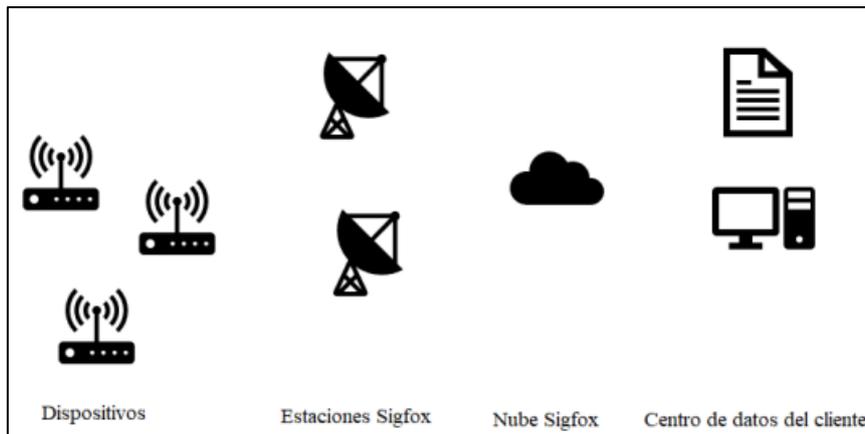
utiliza bandas ISM sin licencia, por ejemplo, 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia. Al emplear la banda estrecha, Sigfox usa el ancho de banda de frecuencia de manera eficiente y experimenta niveles de ruido muy bajos, lo que lleva a un consumo de energía muy bajo, una alta sensibilidad del receptor y un diseño de antena de bajo costo y un rendimiento máximo de solo 100 bps. (SIGFOX, 2020).

Sigfox inicialmente admitía la comunicación de enlace ascendente, pero se transformó a una tecnología bidireccional con una asimetría de enlace. La comunicación de enlace descendente, es decir, los datos de las estaciones base a los dispositivos finales solo puede ocurrir después de una comunicación de enlace ascendente. El número de mensajes a través del enlace ascendente está limitado a 140 mensajes de 12 bytes por día. (IOT FACTORY, 2020).

Arquitectura

La arquitectura de la **Figura 3** Esquema arquitectura Sigfox red se basa en topología en estrella; donde intervienen dispositivos que transmiten los mensajes diariamente, estaciones Sigfox mediante enlaces punto a punto hacia la nube donde modulan / demodulan mensajes, nube Sigfox que envía los mensajes del cliente, y centro de datos de cliente que recibe los mensajes a través de la red.

Figura 3 Esquema arquitectura Sigfox



Nota: La figura muestra el equipamiento de una red Sigfox. Tomado de (Laina Mingarro, 2018)

Características técnicas

Sigfox es una tecnología que está basada en una modulación diferencial DBPSK¹⁴, es decir con relación al desplazamiento diferencial de fase en la transmisión de las señales digitales para la subida hacia una plataforma y una modulación GFSK¹⁵ para la descarga de datos. (SIGFOX, 2020).

Esta tecnología utiliza 200 kHz de la banda de los 868Mhz / 900 MHz para las transmisiones de datos; al no necesitar licencia, se caracteriza por trabajar en sistemas inalámbricos que requieren de un gran espacio de cobertura que puede comprender entre los 30 a 50 km en espacio libre, y de 3 a 10 km en espacios con obstáculos como por ejemplo en ciudades. (Laina Mingarro, 2018).

¹⁴ DBPSK - codificación diferencial binaria por desplazamiento de fase.

¹⁵ GFSK - Modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana.

Sigfox envía una cantidad muy pequeña de datos a baja velocidad, de tal manera que entre los 12 bytes en el enlace descendente el cual corresponde normalmente a los datos captados por los sensores y 8 bytes en enlace ascendente que permiten configurar los dispositivos y enviarles mensajes de control, existe una velocidad aproximada de 100 bit/s y es posible enviar los mensajes a grandes distancias sin mayor dificultad. (Laina Mingarro, 2018).

Una ventaja que presenta Sigfox es la modalidad de transmisión que depende de los requerimientos y el uso; y se sujeta a características fijas como:

- Un dispositivo puede transmitir a cualquier otro, siempre que ambos estén en la misma banda de frecuencia.
- La transmisión entre los dispositivos y la red es asíncrona.
- La demodulación de señales se lleva a cabo por las estaciones base.

Adicional existen modalidades de transmisión basándose en el número de dispositivos y el volumen de mensajes por día:

- Platinum: de 101 a 140 mensajes +4 enlaces de descarga.
- Gold: de 51 a 100 mensajes + 2 enlaces de descarga.
- Silver: de 3 a 50 mensajes +1 enlace de descarga.
- One: de 1 a 2 mensajes sin descarga.

El costo energético, es una de las características que llaman la atención en esta tecnología, porque aproximadamente se consumiría entre 10 a 50 mA en transmisión, y entre 5 y 20 mA en la recepción con potencias máximas de 14 dB en Europa y de 22 dB en América, con un tiempo de 6 segundos de un mensaje en el aire. (Laina Mingarro, 2018).

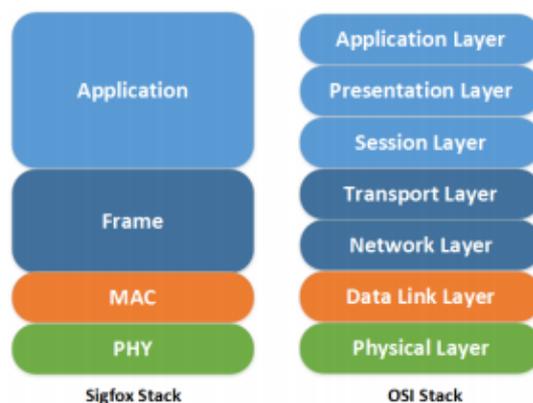
Estándar

La empresa del mismo nombre Sigfox gestiona en conjunto con otros organismos los parámetros para su despliegue, sobre su infraestructura interna y bajo las condiciones institucionales. La tecnología Sigfox no hace uso de estándar 3GPP; está basada en el estándar ETSI LTN. ETSI es una organización de estandarización europea por la cual se rige la tecnología Sigfox. Esta organización maneja su propia tecnología de comunicación LTN (Low Throughput Network) encaminada hacia el internet de las cosas, trabaja en la banda ISM libre, con un ancho de canal de 100Hz, con un esquema de modulación BPSK para enlaces ascendentes, en los mensajes descendentes utiliza una modulación GFSK. (Sakir, 2019)

Protocolos de comunicación

La pila de protocolos Sigfox se compone de tres capas principales: Frame, MAC y capa física y una secundaria la de aplicación, las cuales están referenciadas o relacionadas con las capas del modelo OSI. En la **Figura 4** se aprecia cada una de las capas así:

Figura 4 Comparativa Sigfox y modelo de Referencia OSI



Nota: En la figura se muestra la relación entre el protocolo de Sigfox y el Modelo de referencia OSI, en el que difieren el frame de Sigfox con transporte y red de OSI; así como aplicación de Sigfox con sesión, presentación y aplicación de OSI. Tomado de (Abdelmoumen, 2019).

Protocolo de enlace.

Una vez revisado el protocolo de comunicación se continua con el de enlace, reflejado en la **Tabla 1** en que se resumen las especificaciones del protocolo, así:

Tabla 1 Protocolos de enlace de largo alcance Sigfox

Especificación	Sigfox
Banda de Frecuencia	EU:868 MHz US: 902 MHz
Velocidad de datos	UL: 100 bps DL: 600 bps
Rango	10 km (Urbano) 50 km (Rural)
Potencia de transmisión	EU: 14 dBm US: 22 dBm
Transmisión	UL: DBPSK
Técnica	DL: GFSK UNB
Topología	Estrella
Longitud del paquete	UL: 12 Bytes DL: 8 Bytes
Licencia	Tecnología libremente disponible para chip / dispositivo vendedores. Los operadores de redes pagan a Sigfox

Nota: Se muestra protocolo de enlace correspondiente a la Tecnología Sigfox. (Abdelmoumen, 2019)

LoRa

LoRa es una tecnología diseñada para proveer conectividad de larga distancia para dispositivos que generalmente operan con algún tipo de batería, además del empleo de técnicas de modulación por espectro extendido, tiempo de vida útil de la batería del dispositivo, capacidad de la red y la agrupación de los distintos dispositivos mediante clases de acuerdo con los requerimientos y el tipo de aplicación para los cuales se vayan a utilizar (Alliance, 2020).

Cabe recalcar que se denomina LoRa a la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear enlaces de comunicación de largo alcance, para ello se utiliza la modulación CSS (Chirp Spread Spectrum), que durante mucho ha sido utilizada para comunicaciones militares y espaciales debido a su cobertura y robustez a la interferencia, esta tecnología opera en la banda de los sub-GHz la cual no está licenciada, es decir, no se debe pagar por su uso. (Liberg O. &-P., 2018).

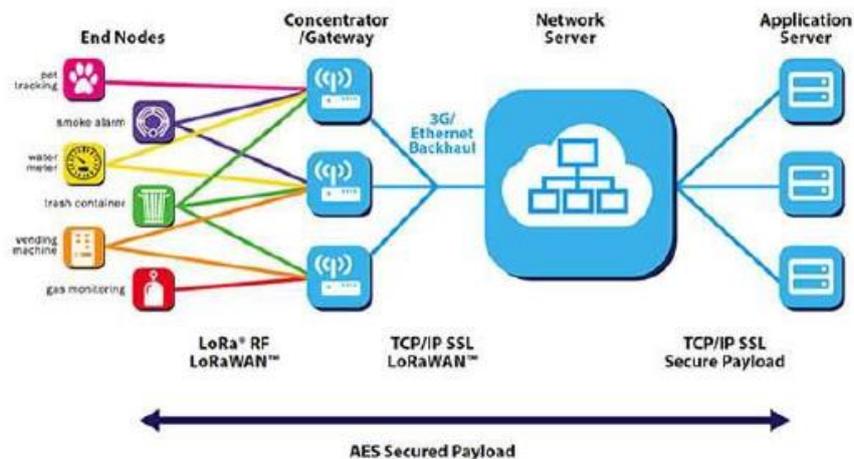
Por otro lado está Lora WAN, que es el protocolo de red para dispositivos finales alimentados por baterías, los cuales están distribuidos en redes con una topología tipo estrella en la que las puertas de enlace (Gateway) retransmiten mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central que encamina los paquetes de cada dispositivo de la red al servidor de aplicación asociado. (Liberg O. &-P., 2018).

Arquitectura

LoRa, es la capa física de la comunicación diseñada por Semtec, y LoRaWAN es el protocolo MAC sobre el que constituye la capa enlace. LoRa maneja 4 elementos como se observa en la *Figura 5*.

- Nodos finales que son los terminales IoT.
- Gateway que hace la función de puente entre nodos y el servidor.
- Servidor de red que gestiona la red, decide responder, eliminar mensajes, elegir tasas de envío.
- Servidor de aplicación, que analiza los datos recolectados y toma decisiones.

Figura 5 Arquitectura de LoRa

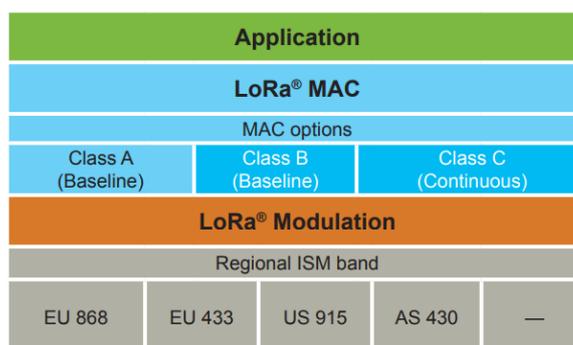


Nota: La figura muestra los elementos que contiene Lora para su funcionamiento, entre ellos hay dispositivos finales, gateways, servidor de red, servidor de aplicación. Tomado de (PANDORAFMS, 2018)

Protocolo de comunicación

En la Figura 6 se presenta el protocolo de comunicación de LoRaWAN, tomando en cuenta que trabaja bajo un protocolo diferente de acuerdo con el área de interés, gestiona modulación LoRa, maneja clases como opción MAC y genera aplicación LoRa.

Figura 6 Protocolo de comunicación LoRaWAN



Nota: Se muestra en la figura el protocolo de comunicación de LoRaWAN. Tomado de (Alliance, 2020)

Bandas de operación

De acuerdo con (smart & Hunt, 2018), LoRa cuenta con un ancho de banda alrededor de 125-500 KHz, el cual cuenta con una tasa de datos de 300bps-11kbps, este tipo de redes están enfocadas en su mayor parte en la transmisión de datos con una gran inmunidad a la interferencia y enfoque en la seguridad a través de la encriptación.

Las bandas de operación de esta tecnología varían de acuerdo con la región y están definidas en las bandas ISM¹⁶, como se especifica en la **Tabla 2** obtenida de la LoRa Alliance, la cual es una organización encargada de los estandarizar dicha tecnología.

Tabla 2 Frecuencias de trabajo LoRa / LoRaWAN

Parámetros	Europa	América	China	Corea/Japón	India
Frecuencia	867-869 MHz	902 – 928 MHz	470 – 510 MHz	920 – 925 MHz	865 – 867 MHz
Canales	10	64 + 8 + 8			
Canales Uplink	125/250Khz	125/500Khz			
Canales Downlink	125Khz	500Khz			
Potencia UP	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm permitido)			
Potencia Down	+14dBm	+27dBm			
SF UP	7-12	7-10			
Data rate	250bps 50kbps	– 980bps – 21.9kbps			
Presupuesto enlace UP	155dB	154dB			
Presupuesto enlace Down	155dB	157dB			
			Por definir por el comité técnico	Por definir por el comité técnico	Por definir por el comité técnico

Nota: Se muestra en la tabla los parámetros de la tecnología conforme el escenario o ambiente de interés a implementar. Tomado de (Alliance, 2020)

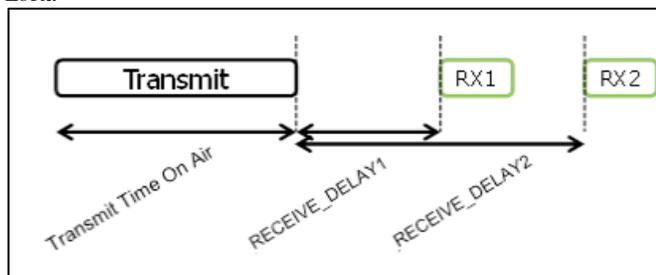
¹⁶ Banda ISM – Banda de radio industrial, científica, médica.

Clasificación mediante clases

La especificación de (Alliance, 2020) define tres clases A, B, y C a las cuales se asigna un dispositivo de acuerdo con la aplicación y los requerimientos que se necesiten de este, cada uno de estos dispositivos debe pertenecer de forma obligatoria a una clase siendo la clase A la utilizada por defecto.

Clase A: Esta clase se enfoca en el uso eficiente de la energía proveniente de la batería, pueden ser usados para comunicaciones bidireccionales ya que al momento en que se realiza la transmisión ésta va seguida por dos breves periodos de tiempo en los que el dispositivo puede recibir información, una vez finalizado este tiempo el dispositivo se vuelve a "dormir" garantizado así el ahorro de energía, como se observa en la **Figura 7** Ventanas de recepción LoRa.

Figura 7 Ventanas de recepción LoRa



Nota: En la figura se muestra las ventanas y tiempos de retardo que debe tomar para recepción de LoRa.

Clase B: Uso eficiente de energía con latencias ligeramente más bajas, con la ventaja de que se puede programar los periodos de tiempo en los cuales el dispositivo

puede recibir información mediante la recepción de una señal de sincronización de tiempo desde el Gateway.

Clase C: Dispositivos que pueden recibir información en cualquier instante a cambio de una reducción en la vida útil de la batería al igual que latencias de trabajo menores a las dos clases anteriores, en esta clasificación los dispositivos no pueden recibir información únicamente cuando están transmitiendo.

Características adicionales

De acuerdo con (Ray & Links Labs, 2018) LoRa ofrece dispone de una gran cantidad de características entre las cuales:

- Cuando se tiene más de un Gateway en la red estos requieren sincronización para operar correctamente.
- Trabaja dentro de los límites del ciclo de trabajo del 1% y 10% del ETSI en el tiempo de transmisión en las bandas 868 y 915.
- Diversidad de antenas porque todas las puertas de enlace escuchan los mismos canales de subida.
- La arquitectura de la red Lora está típicamente dispuesta en una topología de estrella en la que los gateways son un puente transparente que transmite mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central en el backend.

LoRa utiliza seis factores de dispersión (SF7¹⁷ a SF12) para adaptar la velocidad de datos y la compensación del rango. Un factor de dispersión más alto permite un rango más largo a

¹⁷ SF7 – SF12 - Factores de dispersión

expensas de una velocidad de datos más baja, y viceversa. La velocidad de datos de LoRa está entre 300 bps y 50 kbps, dependiendo del factor de dispersión y el ancho de banda del canal.

SF7 es el valor predeterminado y funciona perfectamente. Los mensajes necesitan aproximadamente 250 ms y se considera como alcance bajo. Mientras que, SF12 es el mayor factor de dispersión que no siempre funciona correctamente porque los mensajes necesitan aproximadamente 6 segundos para tener un alcance muy alto. Los factores de dispersión SF7 hasta SF11 funcionan de forma fiable con las tarjetas de LoRa y ECO Power. SF7 es preferible para porque este factor de dispersión tiene retardos de transmisión muy cortos, alcance aceptable. SF12 conlleva que la frecuencia debe ser lo más exacta posible entre todos los nodos. (Radioshuttle, 2020).

Tecnología que utiliza banda de espectro de uso privado

Son tecnologías inalámbricas que se rigen bajo un organismo regulador, además que su infraestructura resulta de mayor esfuerzo porque significa costo de elementos adicionales, licencias de operación, software propietario, otros.

NB-IoT

NB-IoT es una tecnología de IoT de banda estrecha especificada en la versión 13 y 14 del 3GPP en junio de 2016. NB-IoT puede coexistir con GSM¹⁸ y LTE¹⁹ en bandas de frecuencia con licencia, por ejemplo, 700 MHz, 800 MHz y 900 MHz. NB-IoT ocupa un ancho de banda de frecuencia de 200 KHz, que corresponde a un bloque de recursos en la transmisión

¹⁸ GSM - Sistema global para comunicaciones móviles.

¹⁹ LTE – Tecnología de evolución a largo plazo.

GSM y LTE. El protocolo de comunicación NB-IoT se basa en el protocolo LTE, donde NB-IoT reduce las funcionalidades del protocolo LTE al mínimo y las mejora según sea necesario para las aplicaciones de IoT.

La especificación fija una potencia de emisión de 23 dBm, con los que se consiguen valores elevados de cobertura, de hasta 164 dB de atenuación compensable. Las velocidades de transmisión obtenidas oscilan entre los 160 kbps y los 250 kbps, tanto en subida como en bajada.

Características técnicas

A continuación se describen las características de NB-IoT:

- La tecnología NB-IoT usa bandas de frecuencia del espectro licenciada, están dentro del rango de los 700 y 800 MHz por lo que en consecuencia no existen interferencias con otras tecnologías como como Sigfox o LoRa, según (Gradiant, 2018) “Esta ventaja permite que la robustez de las comunicaciones sea mucho mayor y no depende del número de dispositivos en las proximidades”.
- La tecnología NB-IoT de acuerdo con (Rashmi Sharan Sinha, 2017) “Puede tener más de 52000 conexiones (dispositivos) por canal”, esto debido a que los requerimientos de los dispositivos son limitados y no necesitan una cantidad de procesamiento elevada, debido a que el envío de datos que realizan es de poca frecuencia y su latencia en sí no es perjudicial para el funcionamiento de esta tecnología (1,6 a 10 segundos).
- La velocidad máxima del enlace ascendente según (Paguayo, 2019) “se basa de acuerdo con el modo de operación con el que se encuentre operando NB-IoT, existen dos modos

de operación: monótono a una velocidad de 20kbps y multi tono a una velocidad de 250 kbps”.

- La potencia de emisión según (Paguayo, 2019), “La especificación fija una potencia de emisión de 23 dBm con los que consiguen valores elevados de cobertura, de hasta 164 dB de atenuación compensable”.
- Los dispositivos implementados en esta tecnología se encuentran orientados a tener una vida útil prolongada, es decir el uso de su batería se debería de estimar como base a unos 10 años debido a que usa dos técnicas esenciales en el ahorro de energía, estas son: eDRX²⁰ y PSM²¹.

Arquitectura

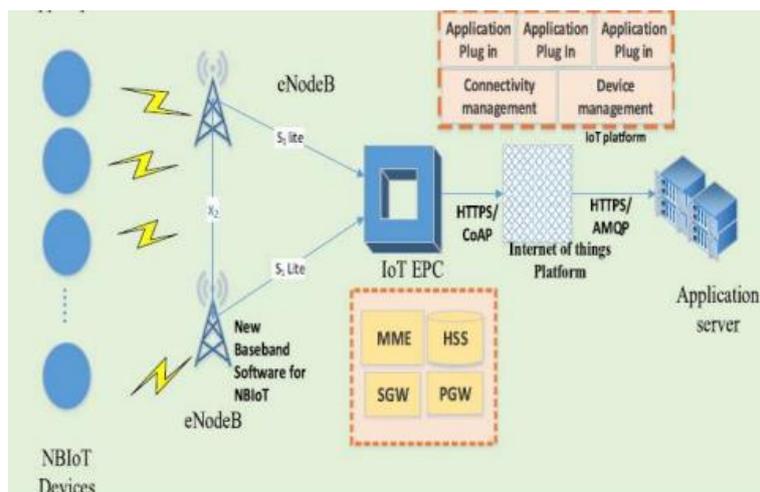
Se muestra la arquitectura que despliega NB-IoT, donde:

- Los dispositivos que conectan al eNodeB usa el nivel de acceso para gestionar recursos, además configura el plano de control y usuario de los demás procesos.
- eNodeB usa el protocolo AS para gestión de red, funciones d control y elementos de usuario.
- Plataforma IoT que sirve para llegar a sus aplicaciones y servicios reduciendo cabeceras y una transmisión más segura.

²⁰ eDRX - Externed discontinuos reception - recepción discontinua externa.

²¹ PSM - Power saving modes – Modo de ahorro de energía.

Figura 8 Arquitectura NB-IoT



Nota: Se presenta los elementos de la red NB-IoT. Tomado de (3GPP, 2017).

Estándar

El 3GPP desarrollo el estándar aplicable hacia NB-IoT, la tecnología que fue desarrollada netamente hacia la aplicabilidad de IoT, los estándares elaborados por 3GPP se basan en diversos aspectos ya sea en velocidad, latencia, consumo de energía, coexistencia con redes móviles 2G,3G y 4G, seguridad y privacidad de redes los cuales proporcionan las garantías necesarias en instantes de cobertura de red para las comunicaciones entre cosas. En la **Tabla 3** se resumen los parámetros que contiene el estándar:

Tabla 3 Estándares eMTC, NB-IoT y EC-GSM-IoT

	eMTC (LTE CatM1)	NB-IoT	EC-GSM-IoT
Deployment	In-band LTE	In-band & Guard-band LTE, standalone	In-band GSM
Coverage	155.7 dB	164 dB for standalone, FSS others	164 dB, with 33dBm power class 154 dB, with 23 dBm power class
Downlink	OFDMA, 15kHz tone spacing, Turbo Code, 16QAM, 1Rx	OFDMA, 15kHz tone spacing, 1 Rx	TDMA/FDMA, GMSK and 8PSK (optional), 1 Rx
Uplink	SC-FDMA, 15kHz tone spacing, Turbo Code, 16 QAM	Single tone, 15kHz and 3.75 kHz spacing SC- FDMA, 15 kHz tone spacing, Turbo Code	TDMA/FDMA, GMSK and 8PSK (optional)
Bandwidth	1.08 MHz	180 kHz	200 kHz per channel, Typical system bandwidth of 2.4 MHz (smaller bandwidth down to 600 kHz being studied within Rel-13)
Power Class	23 dBm, 20 dBm	23 dBm, others TBD	33dBm, 23dBm

Nota. Se resume los parámetros de funcionamiento de cada categoría. Tomado de 3GPP Standards for the Internet of Things (p.6) por 3GPP (https://www.3gpp.org/images/articleimages/iot_large.jpg).

El estándar de NB-IoT consta de las siguientes características según (3GPP, 2017):

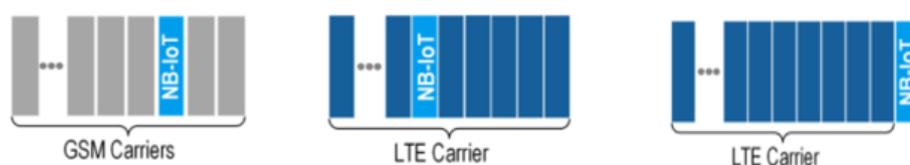
- Cobertura Extendida: Pérdida máxima de acoplamiento de 164 dB (al menos por autónomo).
- Batería de larga duración: 10 años con batería de 5 voltios por hora (según el tráfico y las necesidades de cobertura).
- Soporte para una gran cantidad de dispositivos: al menos 50000 por celda.
- Ancho de banda reducidas, soporte de movilidad y optimizaciones de protocolos adicionales.

Modos de funcionamiento

NB-IoT admite 3 modos de funcionamiento como en la **Figura 9** :

- **Stand-alone:** utiliza un operador independiente.
- **Guard Band:** utilizar los bloques de recursos no utilizados dentro de la banda de protección de un operador LTE.
- **In-band:** utiliza bloques de recursos dentro de una portadora LTE normal.

Figura 9 Modos de funcionamiento: Stand-Alone, In-band, Guard-band



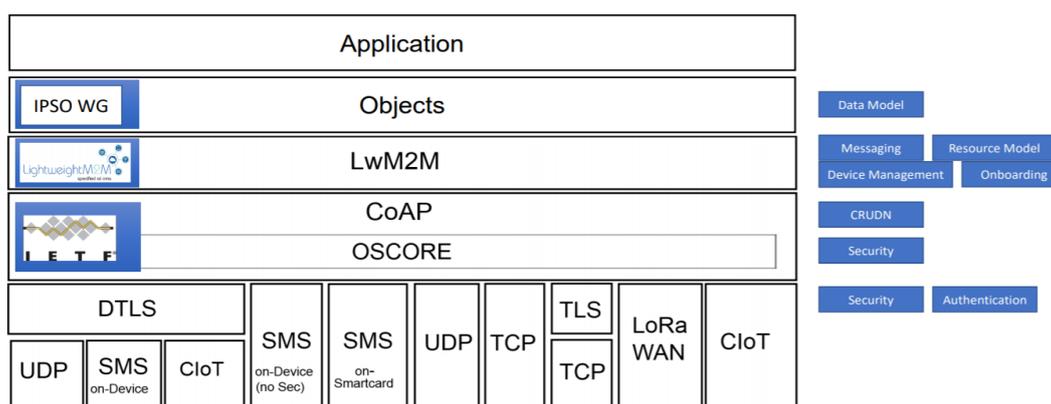
Nota. Tomado de *Diseño de redes IoT con aplicaciones en la gestión de aparcamientos urbanos y la recopilación de datos en entorno agrícola* por Universidad Politécnica de Madrid,

Protocolo de comunicación

El protocolo de comunicación permite que dos o más dispositivos logren tener una conexión estable con la finalidad de transferir información, sea voz, video, mensajería. Con respecto a IoT, el protocolo adecuado para esta aplicación es LwM2M el cual es un protocolo de gestión de dispositivos diseñado para redes de sensores y las demandas de un entorno de máquina a máquina (M2M), El protocolo LwM2M de acuerdo con (WPECWORKS, 2019)

“presenta un diseño arquitectónico moderno basado en REST, define un recurso extensible y un modelo de datos que se basa en un estándar de transferencia de datos segura y eficiente llamado Protocolo de aplicación restringida.” A continuación, en la Figura 10 Pila de protocolo LwM2M v1.1 se observa la pila del protocolo que gestiona NB-IoT.

Figura 10 Pila de protocolo LwM2M v1.1



Nota. Tomado de LwM2M v1.1 (p.3) por OMASpecWorks

Los protocolos implementados en la pila de LwM2M habilita la gestión y habilitación de cada servicio con los siguientes beneficios:

- Mayor eficiencia del uso de ancho de banda basada en la optimización de CoAP²².
- Diseño independiente de la capa transporte que admite protocolos como: UDP²³, TCP²⁴ y SMS²⁵.
- Seguridad basada en DTLS²⁶.
- Seguridad de extremo a extremo con IETF²⁷ OSCORE

²² CoAP - Protocolo de aplicación restringida.

²³ UDP - User Datagram Protocol.

²⁴ TCP - Transmission Control Protocol.

²⁵ SMS - Short Message Service

²⁶ DTLS - Datagram Transport Layer Security

²⁷ IETF - Internet Engineering Task Force

Comparativa de Tecnologías.

Una vez revisadas las condiciones de cada tecnología, se resume algunas ventajas y desventajas de cada tecnología. Así, los parámetros para realizar la comparativa serán la capacidad de envío de datos, rangos de cobertura, eficiencia energética y coste.

Capacidad

En la **Tabla 4** Capacidad en tecnologías IoT, se muestran las velocidades pico que se pueden llegar a alcanzar con las tres tecnologías (NB-IoT, Sigfox, LoRa).

Tabla 4 Capacidad en tecnologías IoT

	Sentido descendente	Sentido ascendente
NB-IoT	250 kbps	250 kbps
Sigfox	600 bps	100 bps
LoRa	50 kbps	50 kbps

Nota: Se resume la capacidad que proporciona en ascendente y descendente las 3 tecnologías a estudiar. Adaptado del Estándar de cada Tecnología.

Así mismo, en la **Tabla 5** Limitaciones de mensajes en tecnologías IoT, se resumen las limitaciones de envío y recepción de mensajes:

Tabla 5 Limitaciones de mensajes en tecnologías IoT

	Limitación mensajes
NB-IoT	No
Sigfox	Sí
LoRa	Sí

Nota: NB-IoT se tiene limitación de envío de mensajes, mientras que para Sigfox y LoRa no existe restricción. Adaptado del Estándar de cada Tecnología

La operación en bandas ISM de Sigfox y LoRa conlleva a trabajar en los márgenes determinados por la legislación de cada región. Ambas deben de cumplir un ciclo de trabajo del 1%, como se puede apreciar en los planes de tarificación de Sigfox, en los que existe un máximo de mensajes a enviar. LoRa podrá trabajar también en bandas de un 10% de ciclo de trabajo.

Cobertura

Se presenta en la **Tabla 6** Cobertura de tecnologías IoT, el rango estimado de dos modos diferentes. En términos de máxima atenuación permitida y de longitud, que en realidad depende del entorno.

Tabla 6 Cobertura de tecnologías IoT

	MCL	Longitud	
		Urbano	Rural
NB-IoT	164 dB	10 – 15 km	
Sigfox	158 dB	3-10 km	20-50 km
LoRa	157 dB	2-5 km	10-15 km

Nota: Se muestra la relación de máxima atenuación permitida y la longitud máxima de alcance. Resumido de estándares de cada tecnología.

Se destaca la capacidad de Sigfox de obtener grandes rangos de cobertura pese a partir con desventaja en términos de potencia de emisión gracias a la tecnología UNB que utiliza.

Consumo energético

Para una batería de referencia de 5WH, todas las tecnologías a estudiar están diseñadas para una vida media de 10 años. Experimentalmente, es difícil encontrar valores de consumo justificados, se puede encontrar un estudio sobre la eficiencia de NB-IoT, Sigfox y LoRa en diferentes entornos de cobertura. En la **Tabla 7** Consumo energético de NB-IoT, Sigfox y LoRa se muestra en resumen el consumo de cada una.

Tabla 7 Consumo energético de NB-IoT, Sigfox y LoRa

	Consumo energético (Envío de 12 Bytes)
NB-IoT – Quectel BC95 B8, TX 23dBm, LB 154 dB	7,74 mW / byte
Sigfox – Chip set STM S2-LP, TX 14 dBm, LB 154 dB	33 mW / byte
LoRa – Acsip S75S incl. 0 repetitions, TX 14 dBm, LB 151 dB	15,47 mW / byte

Nota: LoRa y Sigfox cuentan con una eficiencia mejor que las tecnologías que provienen de LTE.

NB-IoT tiene que mantener una sincronización con la estación base para el envío de mensajes, en un envío y recepción de señalización con la que se pierde menor energía frente a los protocolos asíncronos de LoRa y Sigfox.

Costo

El precio aproximado de los módulos que intervienen en los dispositivos para el envío de información se muestra en la **Tabla 8** Costo módulo tecnologías IoT.

Tabla 8 Costo módulo tecnologías IoT

	Precio
NB-IoT	\$ 80 - 100
Sigfox	\$ 20 - 40
LoRa	\$ 10 – 30

Nota: De acuerdo con el costo por módulo en el mercado americano, LoRa y Sigfox proveen valores más asequibles.

Una tecnología que ofrece mejores prestaciones en cuanto a capacidad de envío también tiene mejores prestaciones con los módulos más baratos.

Seguridad

En la **Tabla 9** Seguridad en tecnologías IoT se puede encontrar las características de seguridad entre las tecnologías.

Tabla 9 Seguridad en tecnologías IoT

	NB-IoT	Sigfox	LoRa
Identificador global único	IMSI	Sí (32 bits)	Opcional
Autenticación del dispositivo	UICC	Dispositivo	Dispositivo o suscripción
Autenticación de la red	LTE	No	Opcional
Protección de identidad	TMSI	No	Parcial
Confidencialidad de datos	Sí	No	Sí
Seguridad End-to- Middle	No	No	Sí
Integridad de los datos	Limitada	Limitada	Variable

Protección frente a ataques de reinyección	Sí	Sí	Sí
Reliable Delivery	Sí	No	No
Clase de infraestructura crítica	11-15	No	No
Actualizable (Dispositivo)	Sí	No	No
Actualizable (Algoritmos)	Opcional	No	No
Monitorización de la red y filtering	Sí	Monitorización	Limitada
Provisión de key	RSP	De antemano	De antemano o OTAA
Negociación de algoritmo	Sí	No	No
Resistencia a Rotura de Clase	Sí	Sí	Opcional
Equipamiento certificado	Requerido	Requerido	Opcional
Red IP	Opcional	No	No

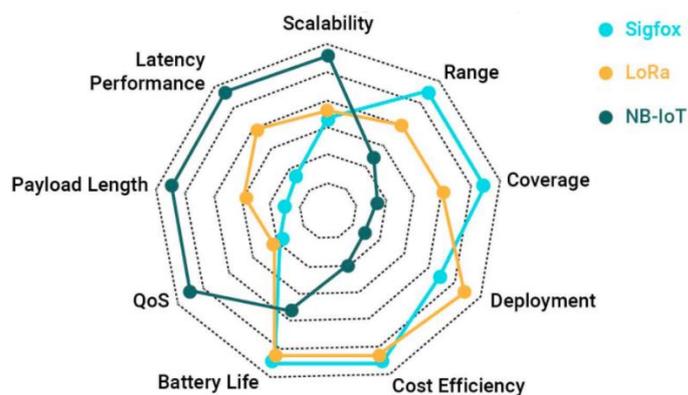
Nota: La opción de NB-IoT mantiene más aspectos de seguridad que la de banda de espectro libre.

Queda claro que la opción que aporta el 3GPP mantiene mejor seguridad que las de espectro libre. LoRa quedaría en un segundo escalón seguido de la tecnología gestionada por Sigfox. LoRa permite que los desarrolladores gestionen los parámetros de seguridad, abriendo la puerta a optimizar la comunicación en caso de que se despliegue en situaciones donde la seguridad no es un factor crítico; pero dejando probables vacíos de seguridad.

Resumen de características

A continuación, se presenta un diagrama sobre las mejores prestaciones de cada tecnología, así en la **Figura 11** Gráfico Comparativo entre Sigfox, LoRa, NB-IoT, con énfasis en escalabilidad, cobertura, despliegue, costo, batería, calidad de servicio, latencia.

Figura 11 Gráfico Comparativo entre Sigfox, LoRa, NB-IoT



Nota. Tomado de *Redes LPWAN para IoT: Sigfox, LORA, NB-IoT* por Bismark (<https://bismark.net.co/sigfox-lora-nb-iot-redes-lpwan-para-iot/>)

Aplicaciones de IoT

Existe infinidad de aplicaciones que han sido planificadas, simuladas e implementadas en varios campos de acción. Una vez que se mira el contexto actual (antes – durante el COVID 19) es necesario describir algunas como: e-health, agricultura inteligente, edificios inteligentes, industria, logística, teleeducación, teletrabajo, gobierno electrónico, protección de datos personales.

Telemedicina.

Las soluciones IoT para la monitorización de pacientes permiten reducir el gasto sanitario de muchas enfermedades, especialmente las enfermedades crónicas, como la diabetes o la hipertensión. El monitoreo de pacientes también puede ayudar a reducir las deficiencias en las instalaciones, con la gestión más eficiente de recursos mediante aplicaciones, gestión de citas, historiales médicos, gestión de centros y hospitales. Con las herramientas mencionadas, es posible realizar la toma de decisiones más efectiva ante posibles eventos. Las soluciones

posibles componen determinado grupo de sensores que se comunican a través de un Gateway sensor y reporta a una plataforma de gestión. La plataforma analiza los datos y envía alertas o recomendaciones, de tal manera que se realice un diagnóstico y tratamiento personalizados.

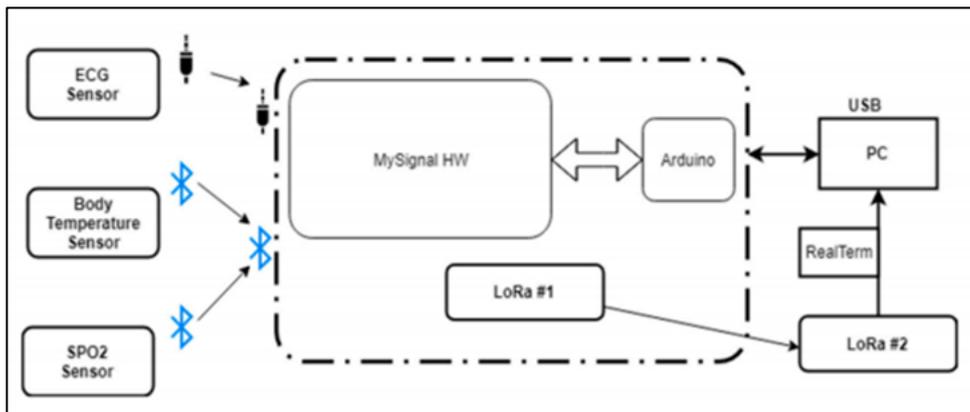
Entre algunos casos ya simulados e implementados se encuentran: detección de infartos, soluciones para personas con asma, protección de datos, seguimiento de signos vitales y pacientes con enfermedad de Parkinson, y detección de caídas.

Según (Carvalho, 2020) los sistemas que usan conexiones LPWAN se pueden dividir en tres grandes áreas donde LoRa participa de manera activa:

- Atención clínica: pacientes hospitalizados que necesitan cuidado continuo.
- Monitoreo remoto: ancianos, niños o casos especiales que necesitan atención continua
- Conciencia del contexto: identificación del estado general del paciente.

Claro ejemplo de lo que se manifiesta en (Carvalho, 2020) se demuestra en la **Figura 12** Ejemplo de aplicación de la tecnología LoRa en una red de sistema de salud.

Figura 12 Ejemplo de aplicación de la tecnología LoRa en una red de sistema de salud



Nota: El ejemplo muestra el uso de tecnología LoRa para ambientes de e-health y telemedicina. Tomado de (Carvalho, 2020)

Agricultura inteligente

En agricultura, se requiere la larga vida útil de la batería de los dispositivos sensores. Los sensores de temperatura, humedad y alcalinidad podrían reducir significativamente el consumo de agua y mejorar el rendimiento. Los dispositivos actualizan los datos detectados varias veces por hora, ya que las condiciones ambientales no han cambiado radicalmente. Por tanto, Sigfox y LoRa son ideales para esta aplicación. Además, muchas granjas hoy en día no tienen cobertura celular LTE; por lo tanto, NB-IoT no es la solución para la agricultura en el futuro cercano. (Girón & Lopez Hurtado, 2020)

Edificio inteligente

Los sensores de temperatura, humedad, seguridad, flujo de agua y enchufes eléctricos alertan a los administradores de propiedades para evitar daños y responder instantáneamente a las solicitudes sin tener un monitor de construcción manual. La limpieza y el uso de los edificios también podrían llevarse a cabo de manera más eficiente. Estos sensores requieren un

bajo costo y una larga duración de la batería. No requieren calidad de servicio ni comunicación frecuente, por lo tanto, Sigfox y LoRa se adaptan mejor a esta clase de aplicaciones.

Industria y logística

El seguimiento para determinar la localización y condiciones apropiadas de los bienes son altamente deseables en logística. En esta aplicación, la mayoría de los requerimientos buscados son el bajo coste de los dispositivos y una gran duración de la batería. Las compañías logísticas habitualmente tienen su propia red, que asegura la cobertura en sus instalaciones y los dispositivos de bajo coste IoT pueden ser fácilmente desplegados en sus vehículos, por ello, las estaciones Sigfox o LoRa pueden usarse cuando los vehículos se encuentran fuera de las instalaciones o cuando los bienes llegan a las localizaciones del cliente. Sin embargo, LoRa permite comunicaciones más fiables que Sigfox cuando están en movimiento a alta velocidad.

En el caso de NB-IoT, la red LTE podría no estar disponible en todas las localizaciones logísticas, como en áreas rurales. Por ello y debido al bajo coste, la gran duración de las baterías y la confiabilidad de las comunicaciones, LoRa es la tecnología más apropiada para esta aplicación.

Algunas aplicaciones consideradas son:

- Detección de humos, fugas, incendios y control general de calidad.
- Seguimiento de la presencia y flujo de líquidos en tuberías y tanques.
- Monitoreo de condiciones de equipos, máquinas e infraestructura de instalaciones.

- Rastreador de mercancía.
- Seguimiento de los niveles de energía de la batería del consumo energético de la máquina.

Aplicaciones en los gobiernos electrónicos

Según (Inversor, 2017), con la llegada de miles de dispositivos de red IoT, las redes gubernamentales se han vuelto más complejas, lo que supone un desafío creciente para los equipos de TI que les dan soporte y actualización. Los administradores de redes están reevaluando su enfoque del soporte de dispositivos inteligentes y cómo aplicar mejor la inteligencia empresarial a la red.

Protección de datos personales

Sigfox al ser un proveedor de Internet de las cosas estableció la importancia de la seguridad dentro de un ambiente IoT determinando habilidades como seguridad de TI, arquitectura de software, seguridad de dispositivos, uso del módulo de seguridad de hardware (HSM) entre otros.

Según (SIGFOX, 2020), se ha desarrollado aplicaciones claves de seguridad en áreas claves, tales como:

- Auditorias de seguridad cibernética y evaluación de seguridad de un extremo a otro.
- Tecnologías de seguridad de software y elementos seguros para la seguridad de los dispositivos.
- Criptoanálisis y definición de algoritmos criptográficos específicos.

Teleeducación

La teleeducación es otra área en la cual IoT puede mejorar la calidad de vida. Actualmente hay muchas aplicaciones relacionadas en Internet por medio de las cuales los alumnos pueden estudiar siguiendo cursos virtuales y evitan tener que transportarse hasta los lugares en los que se imparten las clases; también implica que se pueden desarrollar nuevas herramientas y actividades relacionadas para dispositivos móviles, cámaras de video, cuadernos digitales, libros digitales, etc. (Eggy, Finochietto, Micheletto, & Santos, 2020)

Se podría decir que el uso que se le da a estas tecnologías en teleeducación es posible adaptarlo en áreas rurales y áreas urbanas con equipos multidisciplinarios.

Teletrabajo

El teletrabajo es considerado como un cambio fundamental en el mundo del trabajo derivado de la digitalización o también llamado virtualización del trabajo, que dio lugar a nuevas formas de trabajo, denominadas teletrabajo, trabajo distribuido y trabajo móvil, caracterizadas por la flexibilidad temporal y espacial y es en donde intervienen tecnologías LPWAN o IoT con el fin de monitorizar cada una de las actividades que se realizan en los diferentes cargos de trabajo (Rimbau-Gilabert, 2019).

Referentes legales

Es fundamental presentar un análisis legislativo para las redes con tecnología LPWAN, que justifique la implementación en procesos de IoT. Este análisis permite ampliar la visión sobre la demanda de mercado de tecnologías LPWAN en el entorno nacional. Se indaga sobre

los organismos nacionales e internacionales que dirigen documentos a relación del uso de las tecnologías emergentes en el ámbito público y privado.

ITU

Se define al Internet de las cosas, Territorios Digitales & Ciudades Inteligentes - Internet of Things, Smart Cities como “Infraestructura mundial al servicio de la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión (física y virtual) de las cosas gracias al funcionamiento de tecnologías de la información y la comunicación (existentes y en evolución)”. (ITU, 2012).

Así mismo, el Grupo Temático sobre Ciudades Inteligentes y Sostenibles de la ITU acordó la siguiente definición: "Una Ciudad Inteligente y Sostenible es una ciudad innovadora que aprovecha las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y otros medios para mejorar la calidad de vida, la eficiencia del funcionamiento y los servicios urbanos y la competitividad, al tiempo que se asegura de que responde a las necesidades de las generaciones presentes y futuras en lo que respecta a los aspectos económicos, sociales, medioambientales y culturales" (ITU, 2015).

Ministerio de Telecomunicaciones

La transformación de las ciudades tradicionales en ciudades inteligentes es una tendencia que consigo implica cambios a gobiernos, empresas, sector educativo, salud y personas, en términos de inclusión, accesibilidad y biociencia. Para administrar y gestionar todos estos cambios, la necesidad debe ser clara, además que se justifique la demanda de los

ciudadanos ante estas tecnologías emergentes. Con este enfoque, el MINTEL puso a consideración de la sociedad el Libro Blanco de Territorios Digitales en Ecuador, en el que se incluyen temas como: Modelo de Territorio Digital, Fases de Implementación, Agenda Digital, Encuesta de Madurez, Catálogo de Aplicaciones, plantillas de ordenanzas; entre otros. El modelo de territorio digital ecuatoriano se enfoca en mejorar la calidad de vida del ciudadano, está conformado por: tres componentes transversales: normativa, infraestructura y sistemas de información; además de cuatro ejes fundamentales: gobierno electrónico, alistamiento digital, servicios esenciales, y productividad.

Asimismo, se habla de teleeducación, el teletrabajo y la telemedicina. En el ámbito de la Inclusión Digital, las Tecnologías de Información y Comunicación tienen la potencialidad de impulsar los servicios de educación, trabajo y salud a distancia. En el ámbito educativo, la Teleeducación es un mecanismo para fortalecer el talento humano de manera virtual a través del aprendizaje electrónico, ofrecen la oportunidad a los ciudadanos con escolaridad inconclusa y a quienes no cuentan con educación superior, completar su formación profesional.

El organismo plantea el programa: Tecnologías emergentes para el desarrollo sostenible, donde el objetivo es fomentar el uso de tecnologías emergentes en los sectores: gubernamental, industrial, académico y ciudadanía en general, para apoyar el desarrollo sostenible en beneficio de la sociedad de la información y del conocimiento.

Recomendación R-1238-10

Esta Recomendación proporciona orientación sobre la propagación en interiores en el rango de frecuencia de 300 MHz a 450 GHz. Se da información sobre modelos básicos de pérdidas de transmisión, modelos de propagación por retraso, efectos de la polarización y el

diagrama de radiación de la antena, efectos de la ubicación del transmisor y receptor, efectos de los materiales de construcción, mobiliario y mobiliario, efectos del movimiento de objetos en la habitación, modelo estadístico en uso estático.

Constitución Ecuador

La Constitución del Ecuador avala el uso de recursos tecnológicos y en varios artículos fundamente que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. (Asamblea Nacional República del Ecuador, 2008).

Plan Nacional de Telecomunicaciones

El Plan Nacional de Telecomunicaciones toma en cuenta sus políticas para establecer un escenario de diagnóstico donde se dimensionó la brecha existente en el acceso a las tecnologías emergentes, se determinó el uso que se le da a este servicio a la vez que evaluó el nivel de desarrollo de las habilidades digitales, tanto en la ciudadanía como en las empresas, con énfasis en la seguridad de la información.

Plan de la Sociedad de la Información y del Conocimiento 2018 – 2021

El Plan de la Sociedad de la Información y Comunicación abarca objetivos en cinco áreas de acción, definidas en la Agenda Digital para América Latina y el Caribe (eLAC2018):

- Seguridad de la información y uso responsable de las TIC, que busca de manera primordial fortalecer del marco regulatorio, normativo y estratégico para incrementar la seguridad de la información en el país.
- Economía digital, que como objetivo principal pretende fomentar el desarrollo de la innovación tecnológica en el sector productivo, la evolución del Comercio Electrónico y el desarrollo de nuevos emprendimientos a través de las TIC.
- Tecnologías emergentes, como estrategia para contribuir al desarrollo sostenible, que principalmente se orienta a fomentar el uso de grandes volúmenes de datos, internet de las cosas y tecnologías de registros distribuidos.
- Ciudadanía digital, que busca promover el desarrollo de competencias digitales, así como una cultura de buenas prácticas para un uso eficiente de las TIC, a fin de formar ciudadanos digitales que impulsen la transformación digital.
- Fortalecimiento de la Inclusión digital, que busca reforzar el desarrollo de las habilidades digitales que se consideran necesarias para mejorar las oportunidades de empleo de los ciudadanos. Así como también el desarrollo de un ecosistema de Innovación Social y Emprendimientos Tecnológicos a través de Infocentros.
- Protección de datos personales, como uno de los ámbitos de acción para fortalecer el marco regulatorio, normativo y estratégico para incrementar la seguridad en el tratamiento de los datos personales en el país.

Tecnología LPWAN en Latinoamérica

En la actualidad existen algunas tecnologías inalámbricas a parte de las conocidas es decir 3G/4G y actualmente en proceso 5G, cuyo objetivo es la implementación de sistemas inteligentes interconectados a través de dispositivos que posean un gran alcance de conexión

pero que consuman poca energía y es ahí donde resulta importante la aplicación y uso de estas tecnologías LPWAN.

Según (Montes Valencia, 2019), La tecnología LPWAN pretende dar el salto tecnológico a las comunicaciones inalámbricas de gran alcance. En Latinoamérica esta tecnología está comenzando a analizarse, sin embargo aún son pocas las empresas que se atreven a explorar las posibilidades y potenciar áreas en las cuales es necesario llevar un control continuo de actividades con transmitir a baja potencia.

Latinoamérica según algunas consultoras como Machina Research, tendrá una tasa de crecimiento del 26,95% anualmente en adopción de ecosistemas IoT y Evans Corporation informa que un 60 % de los nuevos proyectos de desarrollo tecnológico en Latinoamérica están orientados a servicios IoT y un 22% ya se están ejecutando. En la actualidad Brasil se encuentra entre unos pocos países, junto con Argentina, Chile y México, que están comenzando a adoptar el IoT de manera más amplia. (Peralta, 2018).

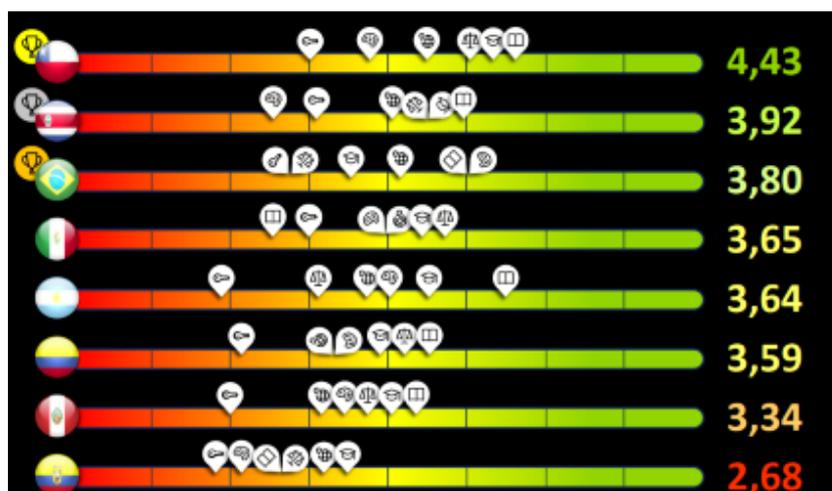
También se espera un fuerte aumento del uso de la banda de 900 MHz, en la región comprendida por las Américas y el Caribe, pues permite una buena cobertura y ahorro de energía justo lo que busca o pretenden las tecnologías LPWAN (CEPAL, N., & Cooperation, G. A. for I., 2018)

Las tecnologías LPWAN más conocidas y usadas en Latinoamérica son: LoRa (no licenciado), Sigfox (no licenciado) y NarrowBand-IoT (licenciado), donde según algunos análisis internacionales Sigfox abarca la mayor parte de la región.

Según (Peralta, 2018), entre los países que poseen un alto grado de adopción en lo referente a tecnologías inalámbricas (LPWAN) se encuentran: Chile, Costa Rica, Brasil, México, Argentina, Colombia, Perú y Ecuador, como en la

Figura 13 Ranking de países que adoptan tecnologías inalámbricas. Ecuador se encuentra en el 7mo lugar después de Perú y Colombia.

Figura 13 Ranking de países que adoptan tecnologías inalámbricas



Nota: Ecuador mantiene un 2,68% de uso de comunicaciones inalámbricas y se ubica en el 8vo país de Latinoamérica. Tomado de (Peralta, 2018)

Aplicaciones en escenario Rural

En escenarios rurales, referidos a agricultura y ganadería, se encuentran los siguientes en Latinoamérica.

- Mejorando la producción de cultivos de banano y la sostenibilidad agrícola en Colombia utilizando redes de sensores.
- Monitorización del ganado en Colombia para aumentar la fertilidad.
- Desarrollo de una plataforma IoT para riego inteligente del agua en Brasil.
- Despliegue de una experiencia pública de IoT en agricultura en Chile.

Aplicaciones en escenario Urbano

La aplicación de la tecnología inalámbrica se desarrolla mejor en ambientes urbanos y es posible estudiar mejor el comportamiento, debido a las interferencias que ocasiona. Se encuentran algunos ejemplos de implementación, así:

- Monitoreo del clima y las condiciones del agua para controlar el cambio climático en el Parque Nacional de Manú en Perú.
- EMITI, WEARABLE para la monitorización de pacientes de TELCEL en México.

Aplicaciones en escenario de interiores

Es posible encontrar las siguientes aplicaciones:

- Monitorización de Bolsas de Sangre-Veracruz (México)
- Historias clínicas en determinados sectores (Uruguay)

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Para explicar la metodología usada en el proyecto de titulación, es importante definir los parámetros que son usados; así: descripción de área de estudio, enfoque y tipo de investigación, métodos y procedimiento de investigación.

Descripción del área de estudio

Este trabajo de titulación comienza con una etapa de fundamentación teórica y legal de las tecnologías LPWAN, así como una revisión de los casos de uso actuales. En este sentido, se realiza el estudio de las tecnologías IoT con mayor presencia en el mercado como son LoRa, Sigfox, y NarrowBand-IoT, así como la conclusión de las ventajas y desventajas que presentan. Posteriormente se indaga casos de uso más adecuados para cada tecnología.

A continuación, se identifican las características de los escenarios exteriores e interiores en base a Recomendaciones de la ITU 1238 -10 y los Modelos de Propagación según los escenarios. Una vez definidos los parámetros y las condiciones aceptables para cada tecnología se resumen en una tabla para facilitar el ingreso de variables en la simulación planificada para obtener la propagación en cada escenario. Los escenarios fueron definidos en el alcance como exteriores e interiores, que en el desarrollo se muestran como tal su funcionamiento.

Una vez definidos los escenarios y las características de cada tecnología se escoge el modelo matemático más adecuado; es decir, de varios existentes se escoge el que cumple con el rango de cobertura de trabajo, los parámetros de frecuencia, atenuación, y mayor alcance.

Para elegir el modelo matemático adecuado de este estudio, se revisó algunos para espacio libre, espacios abiertos, entornos urbanos; sin embargo, el que recoge todas las necesidades es el Modelo de propagación de Okumura – Hata, que puede ser aplicado para el rango de frecuencias propuesto, descartando los demás existentes. A continuación, se indaga sobre la herramienta en que se realiza la simulación y es el App Designer de Matlab versión 2020a.

Luego, se procede a la realización de la simulación correspondiente a escenario exterior como urbano, suburbano y rural; así como interiores como residencial, oficinas, fábrica. Para realizar este procedimiento se revisa las variables a ser ingresadas, los valores deseados como resultado y las gráficas que predicen el comportamiento de las tecnologías LoRa, Sigfox, NB-IoT en escenarios exteriores e interiores. Además, se plantea casos de uso con los campus de la Universidad Técnica del Norte, tales como: Sede Principal, Hospital Antiguo, Granjas Experimentales en Chaltura y San Roque. Se realiza el análisis de resultados de tal manera que se resuelva la mejor tecnología para el escenario determinado.

Finalmente se genera un manual de procedimientos con fines académicos, de acuerdo con lo obtenido en la Interfaz de Matlab; de tal manera que el encargado del Laboratorio de Electrónica, a quien se entregará la Interfaz pueda continuar realizando pruebas en otros escenarios con los estudiantes a su cargo.

Tipo de investigación.

Para desarrollar los objetivos planteados, se definen dos tipos de investigación: el documental y el experimental.

Investigación documental

Se considera de tipo documental porque permite al investigador indagar, resumir e interpretar datos que aportan al proyecto de titulación, a través de fuentes como libros, revistas científicas, artículos de impacto; y desarrollar una fundamentación precisa en el marco teórico. Se revisó investigaciones, modelado y casos de uso concretos de las tecnologías LoRa, Sigfox, NB-IoT para emitir criterios de fundamentación científica y legal válidos.

La guía de gestión de proyectos que se adapta mejor a este trabajo de titulación es PMBOOK, que contiene las etapas de planificación, ejecución y control. Se establece una serie de bloques de trabajo, así como una lista de comprobación de cumplimiento, para alcanzar la calidad deseada, de acuerdo con el tiempo y alcance establecidos.

Guía PMBOOK

El organismo Program Management Institute es una entidad creada en 1983 y que reúne a los más grandes directores de proyectos del mundo para agrupar toda su experiencia en un conjunto de recomendaciones y buenas prácticas para elevar las probabilidades de éxito de cualquier tipo de proyecto (PMI, 2008).

El PMI tiene algunas certificaciones para profesionales en la rama de la dirección de proyectos, una de estas certificaciones y la más conocida en Ecuador es la denominada PMP (Project Manager Profesional), esta certificación está basada en las “buenas prácticas” reunidas en uno de los 5 estándares desarrollados por el PMI, este estándar tiene el nombre de PMBOK²⁸.

²⁸ PMBOOK - Program Management Body of Knowledge.

PMBOK reúne un conjunto de buenas prácticas que son “generalmente reconocidas”, esto significa que alrededor del mundo todas las herramientas, procesos, conocimientos y habilidades que se han puesto en esta guía se usan en la mayoría de los proyectos, la mayor parte de las veces y existe un consenso a nivel mundial en que su aplicación aumenta considerablemente las probabilidades de éxito.

PMBOK no debe entenderse como una metodología estricta, sino como una guía de estándares internacionales para que los profesionales puedan adaptar a cada caso y contexto particular los procesos, reconocidos como buenas prácticas por el PMI que se pueden aplicar a la mayoría de los proyectos. PMBOK documenta la información necesaria para iniciar, planificar, ejecutar, supervisar, controlar, y cerrar un proyecto individual, e identifica los procesos de la dirección de proyectos que han sido reconocidos como buenas prácticas; como se muestra en la **Figura 14 Fases de PMBOOK**:

Figura 14 Fases de PMBOOK

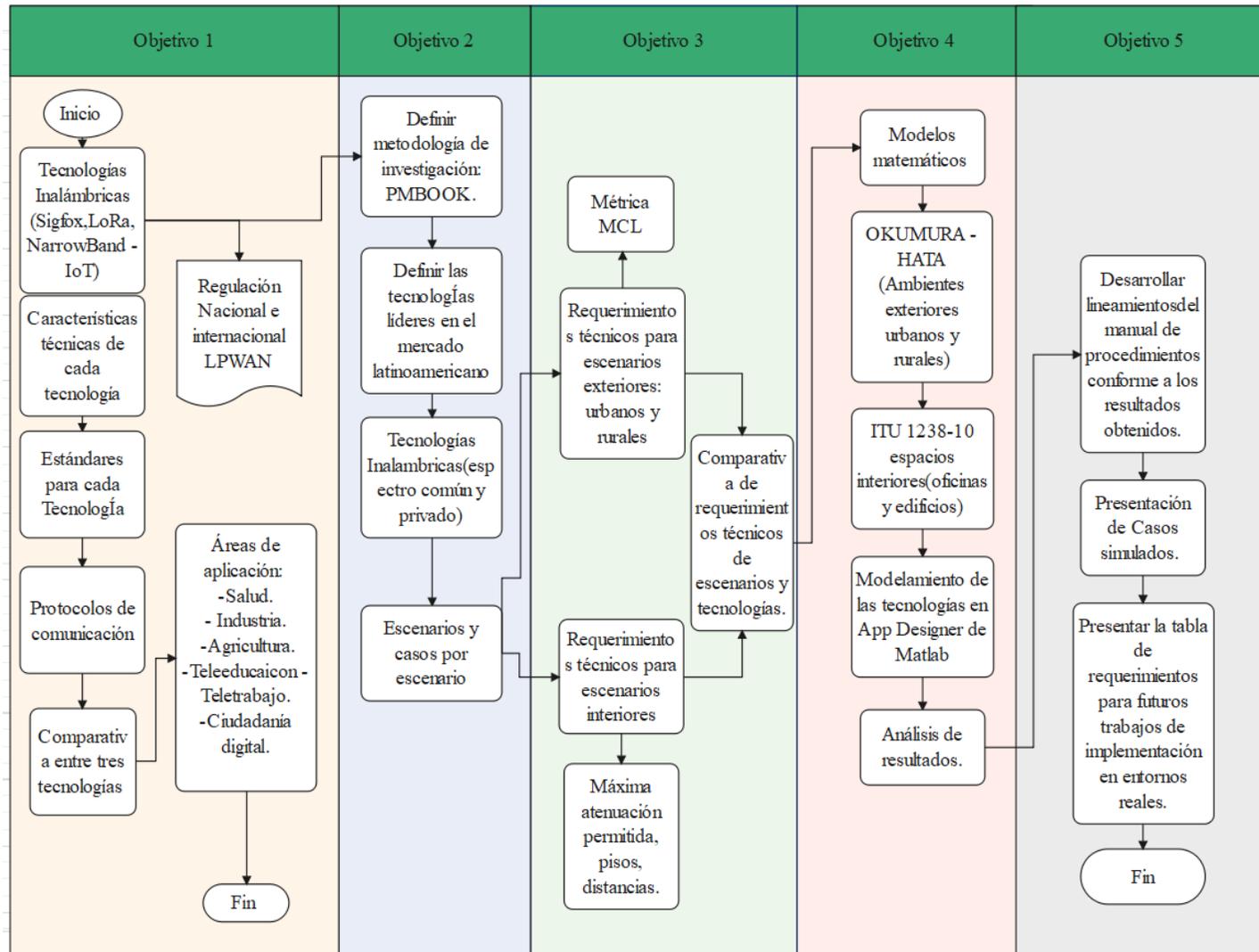


Nota: Se presentan las 4 fases de la Guía PMBOOK. Tomado de (PMI, 2008)

Fase de planificación

Para la fase de planificación se desarrolla un diagrama de flujo de las actividades a realizar, de tal manera que cada objetivo planteado en el proyecto de titulación se ejecute a satisfacción. Se observa en la **Figura 15** Diagrama de flujo de actividades a desarrollar.

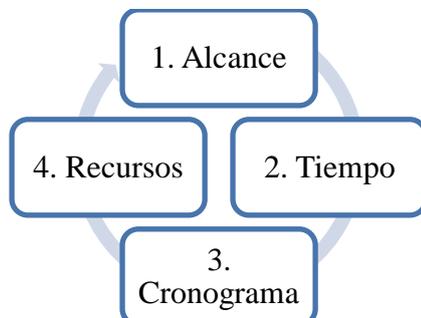
Figura 15 Diagrama de flujo de actividades a desarrollar



Nota: El diagrama de flujo muestra paso a paso las actividades a desarrollar para cumplir con cada objetivo planteado. Realizado por el Autor.

Así mismo, en la fase de planificación de la guía sugiere los parámetros de la **Figura 15** Diagrama de flujo de actividades a desarrollar.

Figura 16 *Parámetros de planificación*



Nota: La Guía PMBOOK plantea los 5 ítems de planificación. Tomado de (PMI, 2008).

A continuación, en la **Tabla 10** Descripción de parámetros del proyecto de titulación se describe cada parámetro de la fase de aplicación.

Tabla 10 *Descripción de parámetros del proyecto de titulación*

Parámetros	Descripción
Alcance	<ul style="list-style-type: none"> Revisión de tecnologías de radio IoT LWPA en escenarios exteriores e interiores. El proyecto está orientado a desarrollarse a partir del mes de febrero hasta el mes de octubre del 2020.
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> Se desarrolla en actividades. Cada actividad con un promedio de ejecución de 5 a 10 días por actividad. El tiempo de ejecución se amplía para considerar revisiones y aprobación de contenidos.
Cronograma	<ul style="list-style-type: none"> Se adjunta el cronograma de actividades en Anexos, separado por Objetivo Actividad Fecha de Inicio Fecha de Fin Verificador día de ejecución. Bibliográficos UTN
Recursos	<ul style="list-style-type: none"> App Designer de Matlab. Office para generar Reportes de Simulación.

Nota: El alcance, tiempo, cronograma y recursos son actividades ya realizadas para la aprobación del presente proyecto de titulación. La Calidad se define en la propuesta de manual de procedimientos. Realizado por el Autor.

Fase de ejecución

Para desarrollar la sección de ejecución de la Guía PMBOOK, y poder documentarla, se describen en la **Tabla 11** Parámetros de ejecución guía PMBOOK.

Tabla 11 Parámetros de ejecución guía PMBOOK

Parámetros	Descripción
Datos de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Escoger Tecnología IoT. • Ingresar frecuencia. • Escoger escenario.
Procesamiento de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Resolver modelo matemático en tecnología y escenario correspondiente.
Datos de salida	<ul style="list-style-type: none"> • Generar valores de enlace.
Gráficas de resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Ver gráfica de resultados relación cobertura vs atenuación.

Nota: Se explican las características de la Interfaz a desarrollar. Realizado por el Autor.

Fase de control

Una vez que se ejecuta el proyecto, continua la fase 3 de control, en que se evalúa a satisfacción de usuario, la propuesta realizada, para este caso la interfaz propuesta. Así mismo, se documenta la calidad del trabajo a través de formulación de comprobación, orientada a usuarios a quien se entrega la Interfaz. Para el presente proyecto, se muestra en la

Tabla 12 Fase de control - PMBOOK

Parámetros	Descripción
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz operativa y funcional con todos los ítems propuestos. • En la elaboración del Manual de procedimientos se adjunta un formato para determinar calidad y funcionalidad de la Interfaz.

Nota: Se explican los procedimientos de calidad de la Interfaz a desarrollar. Realizado por el Autor.

Fase de cierre

Para concluir el proyecto, las evidencias de esta fase son manuales de procedimiento, actas entrega con firma de satisfacción, aval de entrega de Proyecto y otros documentos que muestren que se ha terminado el proyecto.

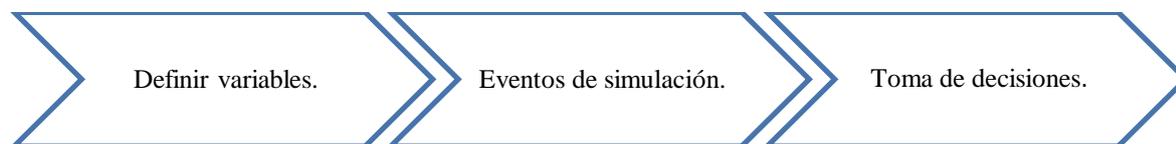
Investigación experimental

La investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir una situación o acontecimiento particular. Su diferencia con los otros tipos de investigación es que el objetivo de estudio y su tratamiento dependen completamente del investigador, de las decisiones que tome para manejar el experimento.

Una vez dada la definición, se considera que el experimento es una situación provocada por el investigador para introducir determinadas variables de estudio para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. En el experimento, es la gestión de variables experimental y el comportamiento dado. Mientras que la experimentación es la repetición voluntaria de los fenómenos para verificar la hipótesis.

En este aspecto, en la **Figura 17** Fases de investigación científica se amplía las fases de la investigación experimental como:

Figura 17 Fases de investigación científica



Nota: Las 3 fases de la investigación científica, a ser descritas en el proyecto de titulación. Tomado de (Acevedo , Linares, & Cachay, 2018)

Variables

El diseño de la interfaz debe gestionar variables de ingreso, analizar datos, y responder con las variables de salida, que en el desarrollo de simulación se van resolviendo.

Eventos de simulación.

Se define actividades o espacios de simulación controlados, para estudiar un caso. En este proyecto los eventos de simulación son evidenciados en un App Designer de Matlab, mismo que contiene el código de las tecnologías y escenarios propuestos. Además, se agrega el código de modelos matemáticos apropiados para los parámetros definidos. A la salida del programa, las gráficas resultantes son la evidencia de la operatividad de la interfaz.

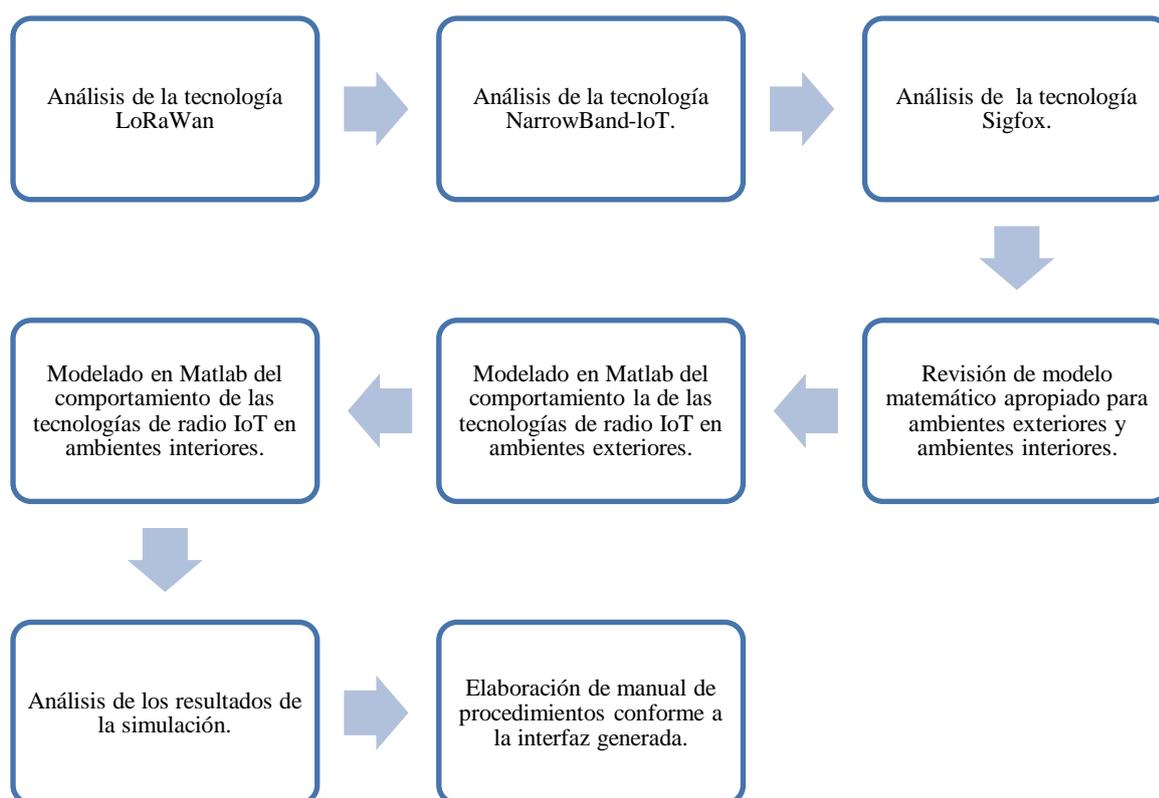
Toma de decisiones

Es la acción que avala el procedimiento realizado por el usuario. Para el proyecto se considera en la toma de decisiones la presentación de un manual de procedimientos, mismo que se encuentra firmado y aprobado por el usuario final.

Procedimiento de investigación

Para el desarrollo de la propuesta, la matriz de control anexada certifica las actividades a realizar; en forma general se describen algunas así:

Figura 18 Actividades para proceso de simulación



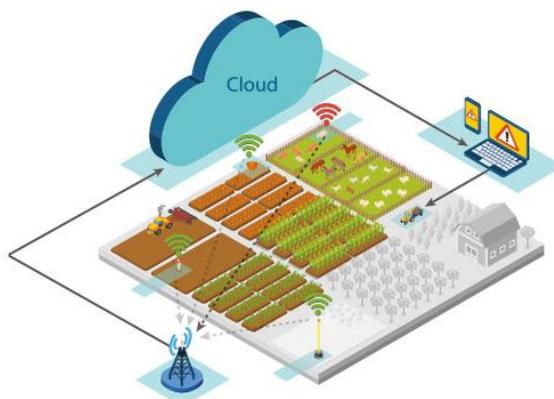
Nota: Se muestran las actividades para desarrollar la simulación propuesta. Realizado por el Autor.

Definición de escenarios.

Inicialmente la tendencia de las mediciones para enlaces está dada para escenarios con línea de vista o sin línea de vista.

- Escenario basado en un área de extensión abierta o exteriores en el que existe visión directa (LOS), como puede ser el caso de la monitorización en el área de la agricultura o ganadería, con se muestra en la Figura 19 Escenario típico con línea de vista.

Figura 19 Escenario típico con línea de vista.



Nota: Se muestra un ejemplo de escenario exterior en agricultura y ganadería inteligente.

- Escenario basado en ambientes interiores, en el que no existe la condición de visión directa (NLOS), donde las condiciones de propagación de las señales son poco favorables; este es un entorno típico de aplicaciones de monitorización de ciudades inteligentes, telemedicina, industria, como se observa en la **Figura 20** Escenario sin línea de vista en ambiente fábrica.

Figura 20 Escenario sin línea de vista en ambiente fábrica



Nota: Se muestra un ejemplo de escenario en interiores, en donde en una fábrica de monitorea las cargas, el transporte.

Métrica de cálculo.

Para el estudio del comportamiento de cada tecnología en estos escenarios, la métrica a utilizar es MCL²⁹ (Maximum Couple Loss), elegida por 3GPP como medida para evaluar la cobertura de tecnologías de acceso radio. En teoría, MCL se puede definir como la pérdida máxima en el nivel de potencia que un sistema puede tolerar y seguir siendo operacional (definido por un nivel mínimo de potencia recibida aceptable).

Las pérdidas de acoplamiento (MCL) máximas soportadas por las diferentes tecnologías de acceso radio se muestran en la **Tabla 13** MCL de las tecnologías LPWAN :

Tabla 13 MCL de las tecnologías LPWAN

Tecnología de acceso radio	Maximum Coupling Loss (MCL) en dB
NB-IoT	164dB
Sigfox	160dB
LoRa	157dB

Nota. Tabla. MCL de las diferentes tecnologías LPWAN

Escenarios urbanos, suburbanos

Las zonas urbanas se caracterizan por estar industrializadas, y presentar todo tipo de infraestructuras, las cuales están enfocadas principalmente en sectores de producción secundarios y terciarios lo cual se ve reflejado en altas tasa de empleo, especialmente en los

²⁹ MCL – Maximum Couple loss

sectores de la ciencia, el comercio, y la tecnología; y en una mejor calidad de servicios públicos respecto a las zonas rurales (Zara, 2017).

En este sentido la aplicación de tecnologías inalámbricas conlleva a tomar en cuenta aspectos como el alcance que depende en gran medida del entorno y del grado de obstrucciones que presente un lugar determinado (Saari, 2018)

Escenario LoRa

De acuerdo con el estudio realizado en el Campus Universitario de Lille se detectó que las señales deficientes dependen de la presencia de edificios importantes que perturban localmente la calidad de la transmisión de datos. Por otro lado se analiza cobertura para algunas tecnologías LPWAN basándose en su MCL (Máximo Coupling Loss) o Máxima pérdida por acoplamiento la cual indica el límite teórico en cuanto al alcance de cada una de estas tecnologías, dichos valores se detallan en la **Tabla 14** Valores de MCL de LoRa y NB-IoT.

Tabla 14 Valores de MCL de LoRa y NB-IoT

	NB-IoT	LoRa	GPRS	Sigfox
MCL [dB]	164	157	144	160

Nota: Valores obtenidos en base a (Lauridsen, 2016)

Dichos valores también pueden ser calculados en base a la siguiente fórmula, en la cual no se considera la ganancia de las antenas en transmisión y recepción.

Ecuación 1 Cálculo MCL

$$MCL (dB) = P_{tx} - R_{xsensitivty} + Noise Floor$$

Nota: La ecuación muestra otra opción para obtener el MCL.

Donde P_{tx} representa la potencia de transmisión
 $R_{xsensitivity}$ es la sensibilidad de antena receptora
 $Noise Floor$ es el nivel de ruido presente en la transmisión.

Otra forma en la cual se puede expresar la cobertura de cualquier tecnología de radio es en base a su Pérdida Máxima de Trayecto (MPL), la cual si tiene en cuenta la ganancia de cada una de las antenas usadas (Techplayon., 2018).

En base a la Tabla 14 se puede observar que tanto LoRa con NB-IoT cuenta grandes valores de MCL lo cual favorece su alcance, sin embargo, al aplicar dichas tecnologías en zonas urbanas este alcance se ve notablemente reducido debido a que las ondas de radio tienen que atravesar las paredes de edificios, árboles y demás elementos los cuales reducen el alcance máximo de cobertura.

Algunos elementos de las zonas urbanas que afectan la cobertura de la Tecnologías de radio IoT son:

- Edificios de altura considerable alrededor de 30 a 50 metros
- Vegetación-arboles entre 5 y 8 metros de altura.
- Materiales de construcción como concreto
- Superficies reflectoras tales como Vidrios, espejos, etc.
- Presencia de otras señales en el ambiente.

En zonas suburbanas estos problemas no son muy notables debido a la poca presencia de edificios, sin embargo aún se ven afectadas por los demás elementos ya mencionados. De acuerdo con (Quimbita & Salvador, 2018), se deben considerar algunos factores importantes para alcanzar mejor desempeño en este tipo de ambientes.

- Tipo y tamaño de antena
- Instalación del Gateway a mayor altura
- Configuración de la potencia de los equipos
- Orientación y tipos de antena utilizadas en los nodos
- Obstáculos intermedios
- Ubicación de los nodos a mayor altura

LoRa cuenta con una ventaja en este sentido ya que permite aumentar el valor máximo de los factores de dispersión lo cual conlleva un aumento en la cobertura y podría ser muy útil para zonas urbanas y suburbanas, sin embargo el aumento de cobertura conlleva un incremento del tiempo en el aire y una disminución de la sensibilidad del receptor lo cual también se refleja en un mayor consumo de energético por parte de los nodos.

Escenario NB-IOT

NB-IoT, que depende de despliegues en sitios sectorizados en base a los operadores de telecomunicaciones presenta en las zonas urbanas con mayor despliegue de antenas por parte de los operadores. Dichas antenas cuentan con una mayor ganancia que las antenas de tecnologías que hacen uso del espectro no licenciado por lo cual tienen una mayor cobertura (Lauridsen, 2016).

Algunas ventajas respecto a la utilización de NB-IoT en ambientes urbanos y suburbanos debido a al uso de bandas licenciadas son:

- Poca interferencia debido a bandas licenciadas
- Mayor cobertura
- Despliegue sobre infraestructura ya existente de operadores locales

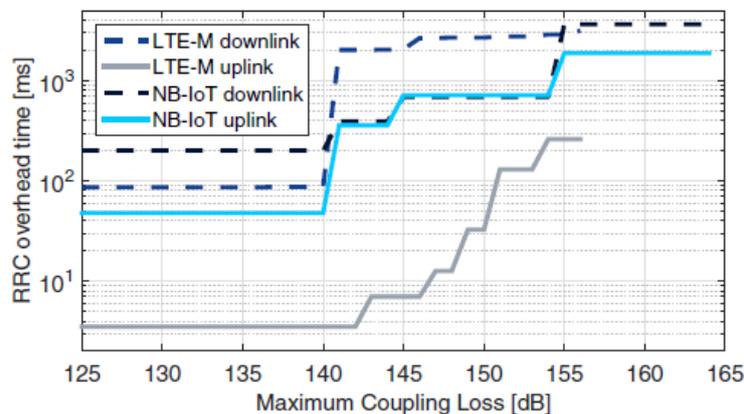
- Menor sobrecarga de paquetes debido a la proximidad de los nodos.
- Reducción de costos por infraestructura

De igual manera que LoRa, NB-IoT también se ve afectada por las condiciones propias del entorno urbano, principalmente por la presencia de edificios los cuales afectan en torno a 20db del total de MCL para cada tecnología debido a la composición de los materiales empleados en la construcción.

De acuerdo con (Lauridsen, 2016) la tecnología NB-IoT presenta una mayor sobrecarga en los valores cercanos a su MCL lo que conlleva a un retraso en la transmisión de la información, dichos valores se pueden observar en la

Figura 21 Sobrecarga respecto a MCL. NB-IoT presenta una escala diferente para carga y descarga, de tal manera que el estado en Downlink presenta mayor MCL que en carga.

Figura 21 Sobrecarga respecto a MCL



Nota: Se muestra la sobre carga respecto al máxima pérdida de acoplamiento. Tomado de (Lauridsen, 2016)

Otro factor para tomar en cuenta es la distribución de las antenas, que de acuerdo con los estudios realizado por (Lauridsen, 2016) en base a antenas omnidireccionales para

tecnologías de banda libre y antenas sectoriales desplegadas por los operadores de la zona para NB-IoT que usa una banda licenciada para su operación.

Escenario rural

Las zonas rurales se caracterizan por la presencia de grandes campos y pueblos que dependen de actividades económicas del sector primario que principalmente son actividades agropecuarias, pesqueras, mineras y de extracción forestal, además se caracteriza por una amplia naturaleza con una gran cantidad de recursos naturales. Algunos aspectos tecnológicos y científicos suelen tardarse en llegar a estas zonas o a veces no encontrarse disponibles como en las zonas urbanas (Zara, 2017).

En este sentido se han realizado trabajos como el de (Lauridsen, 2016) enfocados en zonas urbanas y rurales. Se afirma que es un desafío económico el desplegar infraestructura en áreas remotas ya que los costos se pueden duplicar respecto a las zonas urbanas y esto afecta directamente el modelo de negocios de los operadores de red ya que la densidad demográfica en dichas zonas es muy reducida.

LoRa

LoRa puede resultar una tecnología muy útil para ambientes rurales debido a su largo alcance y bajo consumo, sin embargo, esta requiere de su propio Gateway al cual se conectan los nodos para poder salir a internet, esto representa un aumento en los costos de la infraestructura para la implementación de la red lo cual puede ser un factor determinante en zonas rurales.

Los ambientes rurales no cuentan con la presencia de edificios como en las zonas urbanas lo cual representa una ventaja al momento de optimizar el uso de MCL. Esto quiere decir que en zonas rurales con las mismas tecnologías se puede alcanzar mayor cobertura. En las zonas rurales es mucho más notable la presencia de LOS entre las antenas las cuales no requieren estar situadas en zonas muy elevadas.

Los parámetros decisivos a la hora de elegir un protocolo son:

- Velocidad de datos
- Alcance geográfico en distintos entornos
- Costo de Instalación
- Costo de mantenimiento.
- Consumo energético

Además, en ambientes rurales tecnologías basadas en bandas no licenciadas se desarrollan de mejor manera debido a la poca interferencia presente en el ambiente lo cual repercute en enlaces más estables que en los entornos urbanos (Lauridsen, 2016).

NB-IoT

La tecnología NB-IoT puede tener algunas dificultades en zonas rurales ya que al depender de la infraestructura desplegada por los operadores de red puede que no haya cobertura en ciertas áreas por lo que es un factor de desventaja, sin embargo. Al igual que las tecnologías de espectro no licenciado se benefician por la poca interferencia presente del entorno también lo hace NB-IoT.

Algunos aspectos para considerar en las zonas rurales cuando se utilizan este tipo de tecnología son los patrones de radiación de las antenas en los cuales las antenas de tecnología celular tienen una mayor ganancia y proveen mayor cobertura.

Comparativa de categorías

Cada escenario cuenta con ciertas características que afectan el rendimiento, alcance, tasa de datos etc. En esta tabla de resumen se analiza y diferencia los requerimientos más importantes que se pueden aplicar a cada uno de los escenarios. Para ello se detalla en la

Tabla 15 Comparación requerimientos LoRa y NB-IoT, cada una de las características.

Tabla 15 Comparación requerimientos LoRa y NB-IoT

	LoRa		NB-IoT	
	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Infraestructura	Requerida	Requerida	Poco existente	Mayor despliegue
Alcance (Km)	2 - 10	1 - 3	2 - 12	2-5
Interferencia	Baja	Alta	Baja	
MCL	154	154	164	164
Pérdidas	PL	PL + edificios+ otras redes de la banda ISM	PL	PL + edificios
Spreading Factor	7 - 9	9 - 12	No aplica	No aplica
Altura Antenas(m)	10 -20	30 - 50	Definida por el operador ~25	Definida por el operador ~ 35
Tipo de radiación Antenas	Omnidireccional		Sectorial	
Tipo de Estructuras Predominantes	Galpones, invernaderos	Edificaciones	Galpones, invernaderos	Edificaciones
Superficies Reflectoras	Lagos, Lagunas Naturales	Vidrio, Aluminio	Acero, Lagos, Lagunas Naturales	Vidrio, Acero, Aluminio
Costo de instalación	Medio		Bajo	
Costo de Mantenimiento	Bajo			
Velocidad Requerida	Baja	Media	Baja	Media
Cantidad de Nodos posibles	Alto	Medio	Alto	

Nota: PL (Path Loss) Pérdida de trayecto, ISM bandas de frecuencias dedicadas a la investigación científica y médica.

Cuando se habla de las interferencias a las que están sujetas estas tecnologías sin duda el uso de LoRa en un entorno urbano generara mucha más interferencia respecto a NB-IoT, ya que por el hecho de operar bajo la banda ISM está sujeta a interferencias por otras redes que usen la misma banda, además de la atenuación generada por la pérdida por trayectoria la cual se intensifica en entornos urbano debido a la presencia de edificios los cuales afectan el presupuesto del enlace, por lo cual una muy buen alternativa puede ser NB-IoT la cual cuenta con un mayor MCL para cubrir en la medida de lo posible estar pérdidas y al trabajar con una banda licenciada se tiene menor interferencia. Cuando se habla de alcance sin duda alguna NB-IoT es la mejor opción ya que tanto en entornos urbanos como rurales se puede apreciar una mayor cobertura debido a un mayor MCL.

En este sentido LoRa puede ser perfectamente sustentable en entornos suburbanos y rurales en los cuales se tiene menor interferencia en las bandas de trabajo, lo cual reduce costos de instalación y mantenimiento al no tener que pagar por el uso de una frecuencia en específico como es el caso de NB-IoT. NB-IOT, debido a velocidades de datos mucho más altas, sofisticación MAC y estaciones base de mayor potencia, ofrecerá características más avanzadas para enrutamiento, multidifusión, emisión de firmware, etc.

Cuando se desea interactuar de forma remota con algún dispositivo lo mejor sería utilizar LoRa debido a su bidireccionalidad, ya que cuenta con conexión simétrica, sin embargo, cuenta con tiempos de respuesta ligeramente más largos que NB-IoT por lo cual se debe considerar el tipo de aplicación requerida.

Finalmente, todas las características ofrecidas sirven para determinar cuál tecnología se puede emplear para un proyecto en específico ya que en la realidad se debe tomar en cuenta otros factores como el presupuesto disponible para la implementación del proyecto, la disponibilidad de los recursos en la zona, el coste de los equipos, la calidad del servicio, etc.

Escenarios interiores

Una tecnología inalámbrica implementada en un escenario de interiores al ser de alcance extenso se debe considerar el entorno y las obstrucciones que tengan en el lugar de evaluación ya que esto puede producir pérdidas y degradaciones de la señal transmitida. Según (ITU, 2020), la degradación de la propagación en un canal radioeléctrico en interiores se debe principalmente a:

- La reflexión de los objetos (incluidas paredes y suelos) y la difracción en torno a éstos dentro de las salas.
- La pérdida de transmisión a través de paredes, suelos y otros obstáculos.
- La canalización de la energía, especialmente en pasillos a frecuencias elevadas.
- El movimiento de personas y objetos en la sala, lo que puede incluir uno o ambos extremos del enlace radioeléctrico.

Y produce degradaciones tales como:

- Pérdida del trayecto de la onda
- Variación temporal
- Los efectos de los trayectos múltiples de los componentes reflejados y difractados de la onda.

El modelo descrito a continuación se considera general en cuanto al lugar de instalación, ya que requiere poca información sobre el trayecto o el lugar de instalación. Dentro del modelo se considera la pérdida a través de varios pisos. El modelo básico se presenta así:

Ecuación 2 *Pérdida de propagación*

$$L_{\text{total}} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n)$$

Donde:

N: coeficiente de pérdida de potencia debido a la distancia

f: frecuencia (MHz)

d: distancia de separación (m) entre la estación base y el terminal portátil (siendo $d > 1$ m)

d_o : distancia de referencia

$L(d_o)$: pérdida de trayecto en d_o (dB) para una distancia de referencia d_o a 1m y

suponiendo propagación en el espacio libre $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ donde f es en MHz

L_f : factor de pérdida debida a la penetración del suelo (dB)

n: número de pisos entre la estación base y el terminal portátil ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB para $n=0$

Modelos de propagación

Existen modelos de propagación para aplicación en espacio libre, escenarios exteriores con interferencias, rangos de frecuencias extremadamente altos, modelos que dependen de más variables del entorno. Entonces, modelo que más se adapta a un sistema exterior requiriendo únicamente frecuencia de trabajo, altura de antenas y distancia es el modelo de Okumura – Hata, descartando otros modelos también válidos.

Desarrollado por Masaharu Hata en 1980 y basado en los resultados de las mediciones realizadas por Yoshihisa Okumura en la ciudad de Tokio, Japón, consiste en un conjunto de ecuaciones que permite estimar las pérdidas de propagación en diferentes tipos de zonas (urbana, semiurbana y abierta o rural) (Thomas, 2019).

Es uno de los modelos más utilizados en la planificación y dimensionamiento del segmento de propagación de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, un modelo empírico para un rango de frecuencias entre 150 MHz y 1.5 GHz, con una altura de la antena de transmisión de 30 m a 200 m y una altura de la antena receptora de 1 m a 10 m. Es el margen dentro del que se encuentran los 3 sistemas en estudio. Este modelo permite apreciar las pérdidas básicas de propagación, con diversos factores de corrección en función del entorno. Los valores del entorno urbano han sido estandarizados por la (ITU, 2020) y definen la predicción de pérdidas mediante categorías de clutter y de escenarios, recogidas tal que:

- Área abierta: representa un espacio abierto, sin árboles o edificios grandes en un rango de 300-400 m. Por ejemplo, campos de cultivo o granjas.
- Área suburbana: se corresponde con zonas con árboles y casas, además de un conjunto de obstáculos cerca de la estación, pero no muy congestionado.
- Área urbana: grandes ciudades con edificios y arboles altos o grandes urbanizaciones con una geometría de edificios y arboles muy cercanas entre sí.

La fórmula del modelo está plasmada en varios trabajos de investigación, de modo se expresan a continuación:

Ecuación 3 Ecuación modelo de propagación Okumura Hata

$$Lp(dB) = 69.55 + 26.16 \log(fc) - 13.82 \log(hte) - a(hre) + [44.9 - 6.55 \log(hte)] \log(d)$$

Donde,

fc = Frecuencia de trabajo en MHz

hte = Altura antena de transmisión en metros

hre = Altura antena de recepción en metros

$a(hre)$ = Factor de corrección de la antena receptora de acuerdo con la cobertura:

Datos iniciales,

d: Distancia entre transmisor y receptor, entre 1 km y 20 km

h1: Altura efectiva de la antena transmisora, entre 30 m y 200 m

h2: Altura efectiva de la antena receptora, entre 1 m y 10 m

Ciudad tamaño pequeño – medio

Ecuación 4 Ecuación para ciudad pequeña

$$a(hre) = [1.1 \log(fc) - 0.7]hre - [1.56 \log(fc) - 0.8]$$

Ciudad grande y frecuencias menores o iguales a 300MHz

Ecuación 5 Modelo para ciudad grande con frecuencia pequeña

$$a(hre) = 8.29[\log(1.54hre)]^2 - 1.1$$

Ciudad grande y frecuencias mayores o iguales a 300MHz

Ecuación 6 *Modelo para ciudad grande con frecuencia mayor*

$$a(hre) = 3.2[\log(11.75hre)]^2 - 4.97$$

Para áreas suburbanas, se tiene la siguiente modificación de la formula estándar:

Ecuación 7 *Modificación estándar de fórmula de propagación*

$$L_{50}(dB) = L_p(\text{urbano}) - 2 \left[\log \left(\frac{fc}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

Para calcular las pérdidas en áreas rurales abiertas se tiene lo siguiente:

Ecuación 8 *Pérdida en área rural*

$$L_{50}(dB) = L_p(\text{urbano}) - 4.78[\log(fc)]^2 + 18.33\log(fc) - 40.94$$

En base a las fórmulas anteriores es posible simular escenarios exteriores y se procede a graficar la relación cobertura vs atenuación, al ingresar un valor de frecuencia de transmisión, una altura de antenas en base al modelo y una distancia adecuada para el análisis.

Adicional al modelo matemático, existe una Recomendación que proporciona la (ITU, 2020) para predecir la propagación en espacios interiores. Es así como se revisa la R-1238-10 y se resume los parámetros a ser usados. La recomendación ITU-R expone los valores de los coeficientes de pérdidas de potencia dentro de diversos entornos interiores, como edificios residenciales, edificios de oficinas, edificios comerciales entre otros.

La recomendación ITU 1238-10 tiene su última actualización de la página oficial en enero del 2020. Esta guía se centra en sistemas radioeléctricos en espacios de interiores los

cuales según la frecuencia en la que el sistema se encuentra comunicando tiene diversificaciones de la señal de acuerdo al tipo de entorno interior en el que este instalado un sistema, por lo tanto través de la presente recomendación se establece ciertos parámetros que permitan al sistema trabajar con eficacia evitando interferencia de externos en la zona de cobertura, de acuerdo con la (ITU, 2020) “en interiores la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites afectan además a la propagación”.

El modelo presentado por la ITU con respecto a la pérdida de transmisión en interiores denominado pérdida por trayecto supone que la estación base y el terminal portátil se encuentran situados en un mismo edificio, el modelo se considera general en cuanto al lugar de instalación donde describe la pérdida de señal a través de varios pisos, paredes y material inmobiliario, se caracteriza por una pérdida de trayecto media y las estadísticas asociadas de desvanecimiento debido a sombras.

El modelo básico se presenta de la siguiente manera:

Ecuación 9 *Pérdida de transmisión básica en una distancia dada.*

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n)$$

Donde:

N : Coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia. el valor del coeficiente de pérdida es $N=10n$

f : Frecuencia en MHz

d : distancia de separación entre el transmisor (Tx) y el receptor R(x) medida en metros (m) (siendo $d > 1m$)

d_o : distancia de referencia, la distancia de referencia es de 1m

$L(d_o)$: Pérdida de transmisión básica en d_o (dB) para una distancia de referencia d_o a 1m y suponiendo propagación en el espacio libre $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ donde f es en MHz

L_f : Factor de pérdida debida a la penetración en el suelo (dB), el valor de L_f se obtiene a partir de $L_f(n) = 15 + 4(n - 1)$ ”

n : número de pisos entre la estación base y el terminal portátil ($n \geq 0$), $L_f = 0$ para $n=0$

Parametrización de escenarios

La Recomendación de la ITU, explica parámetros de acuerdo con los escenarios interiores así:

Para LoRa / Sigfox

Las tecnologías LoRa y Sigfox al utilizar bandas de frecuencia ISM presentan diferentes comportamientos. Las tablas expuestas a continuación presentan los coeficientes de pérdidas presentes en el modelo general presentado por la ITU de acuerdo con la frecuencia de trabajo y el entorno de aplicación.

Tabla 16 Coeficientes de pérdida de potencia

Frecuencia (MHz)	Edificio Residencial	Edificio Oficinas	Fábrica
800	22.5	22.5	21.1
900	22.5	33	21.1

Nota: N, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores para la tecnología LoRa y Sigfox con bandas de frecuencia ISM ITU-R P.1238-10 por ITU (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-10-201908-I!!PDF-S.pdf)

Los factores de pérdida de penetración se calculan a través de la formula expuesta por la ITU que depende de la frecuencia y del número de plantas n que exista de diferencia entre el transmisor y el receptor, que está definido en la siguiente tabla así:

Tabla 17 Factor de pérdida por penetración del suelo

Frecuencia (MHz)	Edificio Residencial	Edificio Oficinas	Fábrica
900	9+5(n-1)	9 (1 piso)	0
		19 (2 pisos)	
		24 (3 pisos)	

Nota: Factores de pérdida de penetración del suelo, L_f (dB), para la tecnología LoRa (902-920) y Sigfox (868-920) con bandas de frecuencia ISM. Recomendación ITU-R P.1238-10 por ITU (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-10-201908-I!!PDF-S.pdf)

Para NB-IoT

Los coeficientes de pérdida de potencia implementados en el modelo de la ITU con respecto a las tecnologías NB-IoT en frecuencias de 800,1800 y 2600 MHz son:

Tabla 18 Coeficientes de pérdida de potencia den NB-IoT

Frecuencia (MHz)	Edificio Residencial (dBm)	Edificio Oficinas (dBm)	Fábrica (dBm)
800	22.5	22.5	21.1
1800	28	30	21.1
2600	28	44	33

Nota: Coeficientes de pérdida de potencia, N , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores para la tecnología NB-IoT (800-1800-2600) con bandas de frecuencia reservada Recomendación ITU-R P.1238-10 por ITU (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-10-201908-I!!PDF-S.pdf)

Los factores de pérdida de penetración se calculan a través de la formula expuesta por la ITU que depende de la frecuencia y del número de plantas n que exista de diferencia entre el transmisor y el receptor.

Tabla 19 Factor de pérdida de penetración NB-IoT

Frecuencia (MHz)	Edificio Residencial	Edificio Oficinas	Fábrica
800	9+5(n-1)	9 (1 piso)	0
		19 (2 pisos)	
		24 (3 pisos)	
1800-2000	4n	15+4(n-1)	0
2600	10	14	0

Nota: Factores de pérdida de penetración del suelo, L_f (dB), para la tecnología NB-IoT (800-1800-2600) con bandas de frecuencia reservada Recomendación ITU-R P.1238-10 por ITU (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-10-201908-I!!PDF-S.pdf)

Pérdida por acoplamiento

La pérdida por acoplamiento ocurre cada vez que una conexión se hace de o hacia una línea de transmisión o cuando se conectan dos partes separadas de una línea de transmisión.

Tabla 20 Valores de MCL soportadas

Tecnología implementada	Pérdida por acoplamiento (MCL)
NB-IoT	158 dB
Sigfox	164 dB
LoRa	154 dB

Nota: Se muestran los valores de MCL soportadas para las tecnologías de estudio: LoRa, Sigfox y NB-IoT. Tomado de What is LoRawan por LoRa Alliance (<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>)

Para cada valor de pérdida de potencia, pérdida de penetración del suelo y valor de MCL se basa de acuerdo con la frecuencia el cual la tecnología se encuentre trabajando y en el entorno de edificación, ya sea edificio de oficinas, residencial y fábrica. Cada tecnología produce mayor o menor pérdidas totales en cada edificio diferenciando la eficiencia de la comunicación de cada tecnología en los edificios.

Finalmente, la parametrización está dada, porque se reconoce las tres tecnologías con las que se trabaja, LoRa y Sigfox en banda de espectro libre y NB-IoT en banda de espectro licenciado. Se define los escenarios exteriores como ambientes urbanos, suburbanos y rurales; así como los escenarios interiores como ambiente de oficina y fábrica. Se adopta el modelo Okumura Hata para predecir la propagación de señales en ambientes exteriores y la Recomendación ITU R-1238-10 para escenarios interiores. Además que se adapta los parámetros de acuerdo con la necesidad de la Interfaz a diseñar.

CAPITULO IV

SIMULACIÓN, RESULTADOS Y PROPUESTA.

Una vez definidos los parámetros de los ambientes a simular por cada tecnología en espectro no licenciado y licenciado, se realiza la planificación de su interfaz gráfica. El desarrollo de la simulación de cobertura está dado por el ingreso de código en la herramienta de software matemático Matlab, mediante el uso de su interfaz gráfica App Designer.

La versión de Matlab 2020b es la última actualización, misma que no genera ningún error y se encuentra operativa para ejecutar código y generar resultados. Es una herramienta colaborativa que cuenta con varios complementos para redes inalámbricas; sin embargo, todavía no existe un complemento específico para determinar cobertura en LoRa, Sigfox ni NB-IoT.

App Designer es un entorno de desarrollo interactivo para diseñar una aplicación y programar su comportamiento. Proporciona una versión totalmente integrada del editor de MATLAB y un gran conjunto de componentes interactivos de la Interfaz.

Después de familiarizarse con el software, se toma en consideración los efectos de propagación mediante el modelo Okumura-Hata, como modelo de propagación básico para el entendimiento del comportamiento en diferentes entornos (rural o área abierta, suburbano y urbano), y la recomendación ITU-R P.1238-10 que proporciona orientación sobre la propagación en interiores con el fin de realizar la evaluación del rendimiento.

Los valores básicos de cada tecnología, utilizados en la simulación se muestran a continuación en la **Tabla 21** Valores iniciales de simulación.:

Tabla 21 Valores iniciales de simulación.

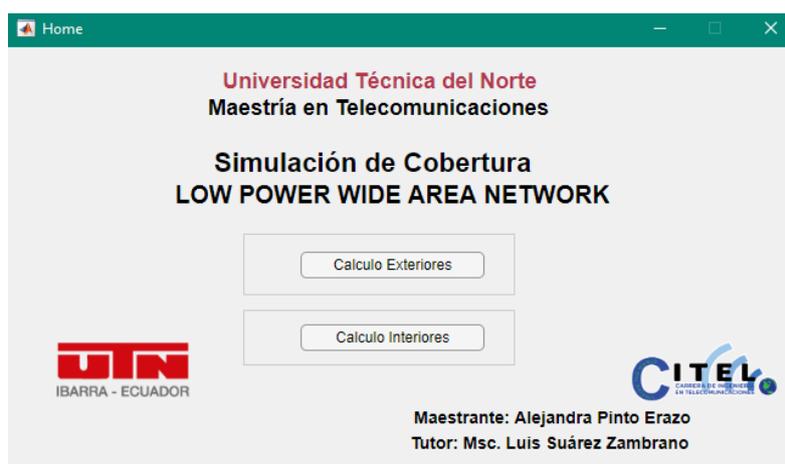
Parámetro	NB IoT	LoRa	Sigfox
Espectro (MHz)	800		
	1800	902-920	902-920
	2600		
Potencia máxima de transmisión	23	14	14
MCL	158	154	164

Nota: Se muestran los 3 valores básicos para determinar las ecuaciones de la señal y su desempeño: el espectro en que trabajan, la máxima potencia de transmisión y la máxima pérdida de acoplamiento permitido. Tomado de las fuentes oficiales.

Interfaz Home

La interfaz final cuenta con tres ventanas las cuales corresponden inicialmente a la interfaz principal (Home) desde la cual se accede a la ventana correspondientes tanto para exteriores e interiores. En cada una es posible analizar la cobertura y las pérdidas de cada una de las tecnologías en los dos entornos simulados.

Figura 22 Interfaz Home



Nota: Realizado por el Autor

Interfaz Exteriores

En la interfaz de exteriores se requiere seleccionar el tipo de tecnología por analizar, la frecuencia de operación de esta, el tipo de escenario exterior que se desea simular (urbano, suburbano, rural), la altura de la antena de transmisión, la altura de la antena de recepción, y la distancia del enlace en Km. El cálculo de pérdidas se lleva a cabo en base al modelo Okumura-Hata, por lo cual la validación de los datos ingresados se lleva a cabo en base a este modelo. Ver **Figura 23** Diagrama de Flujo de Interfaz de Exteriores.

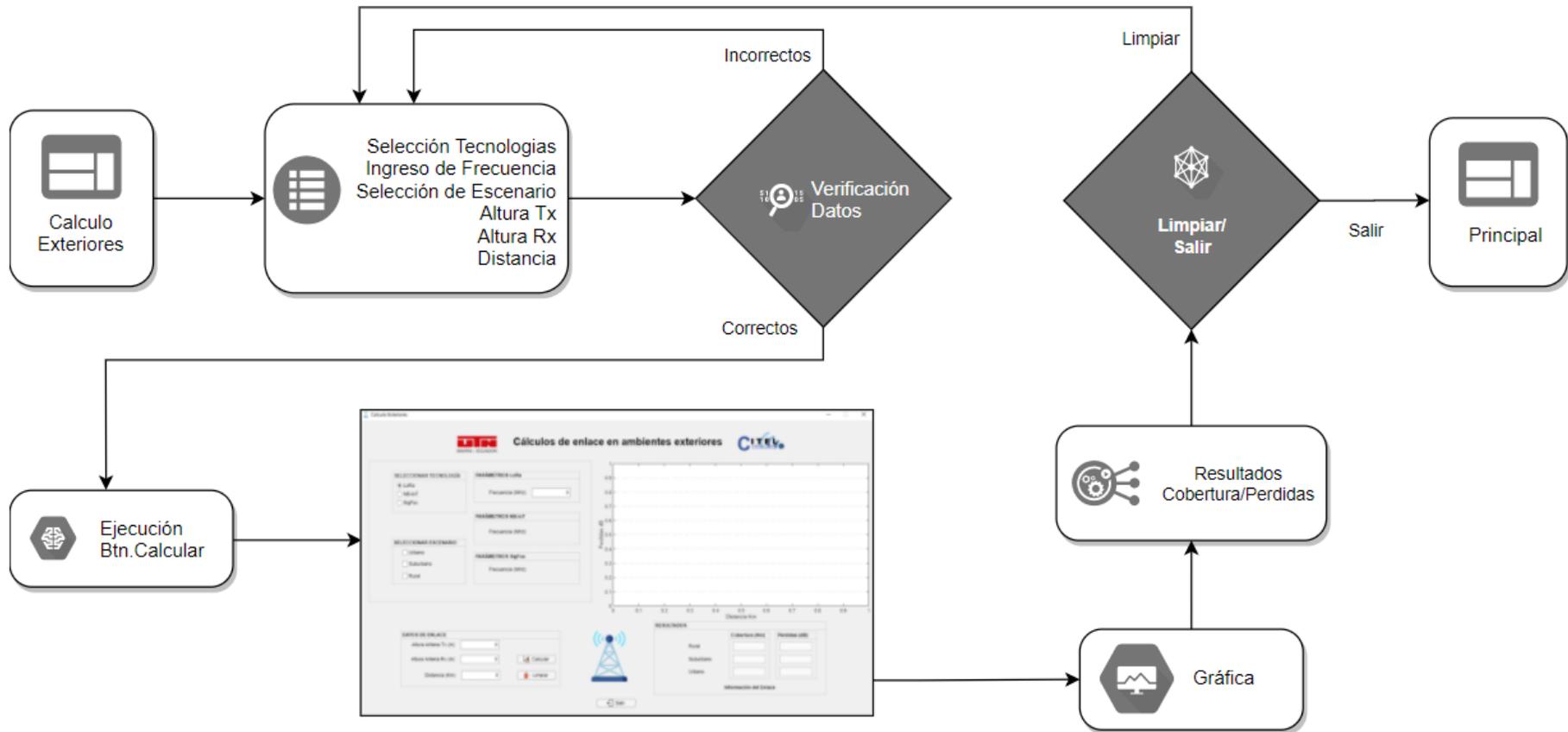
Interfaz Interiores

Por otro lado, para la interfaz de interiores, al igual que en la primera se requiere como datos de entrada la selección de la tecnología por analizar, la frecuencia de esta, tipo de edificación (Oficinas, Residencial, Fábrica), la distancia del enlace en metros y el número de plantas de la edificación. El cálculo de pérdidas se lleva a cabo en base al modelo ITU 1238-9 por lo cual las validaciones se llevan a cabo en base a este modelo. Ver **Figura 24** Diagrama de Flujo Interiores

A continuación se muestra en la

Figura 23 Diagrama de Flujo de Interfaz de Exteriores.

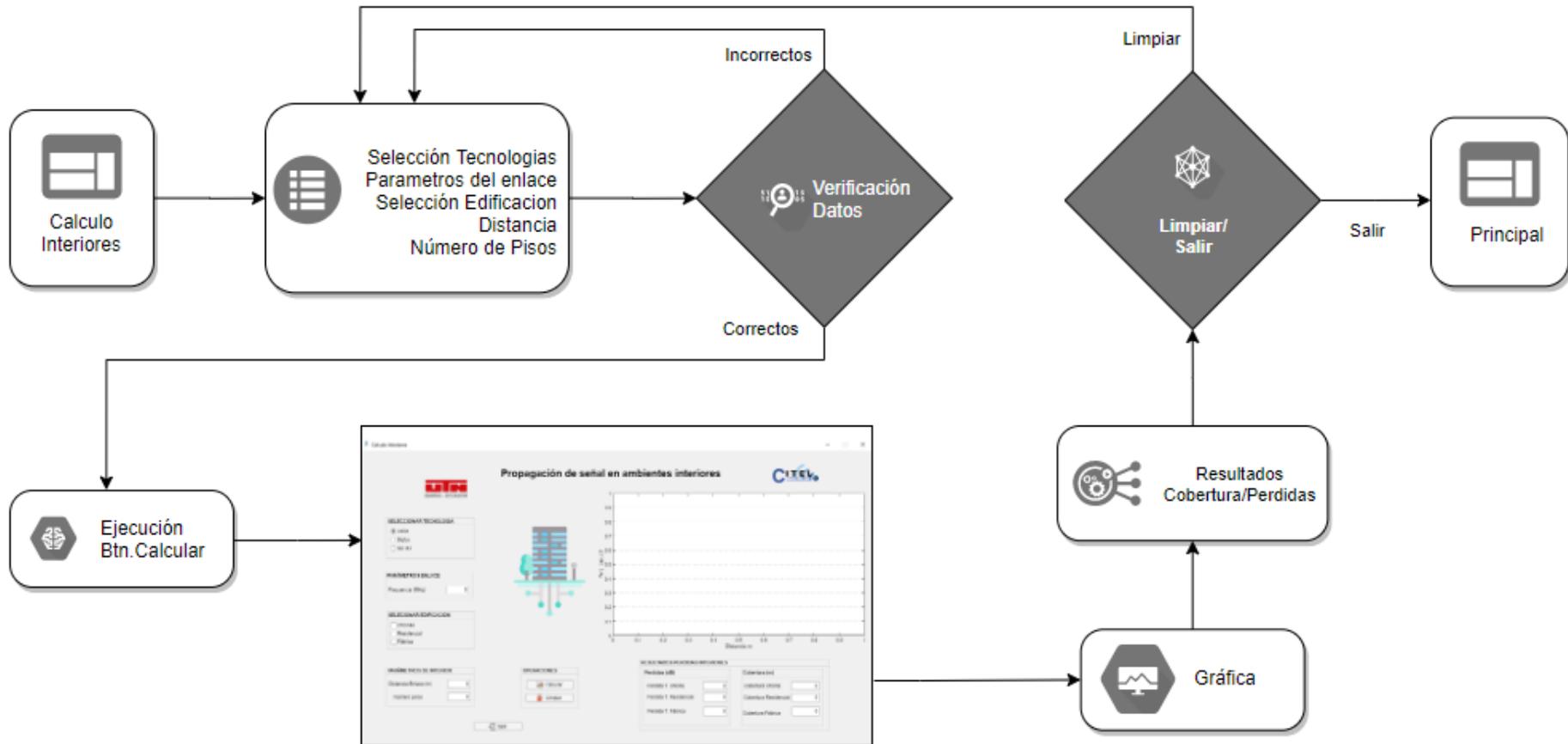
Figura 23 Diagrama de Flujo de Interfaz de Exteriores



Nota: Realizado por el Autor

A continuación se muestra la **Figura 24** Diagrama de Flujo Interiores.

Figura 24 Diagrama de Flujo Interiores



Nota: Realizado por el Autor

Resultados Exteriores

En esta sección se analiza los resultados obtenidos mediante la interfaz de simulación realizada a partir de los datos de entrada mostrados en la Tabla 22 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en exteriores., a partir de dichos datos se presenta el análisis para las tres tecnologías analizadas LoRa, NB-IoT, y Sigfox; en la

Tabla 23 Rango de frecuencia para LoRa, Sigfox, NB-IoT se presenta el rango de valores disponibles para cada una de las frecuencias.

Tabla 22 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en exteriores.

Parámetros	Unidades(m)/(km)
Antena Tx	48 m
Antena Rx	3 m
Distancia	15 km

Nota: Ingreso de datos en exteriores.

Tabla 23 Rango de frecuencia para LoRa, Sigfox, NB-IoT

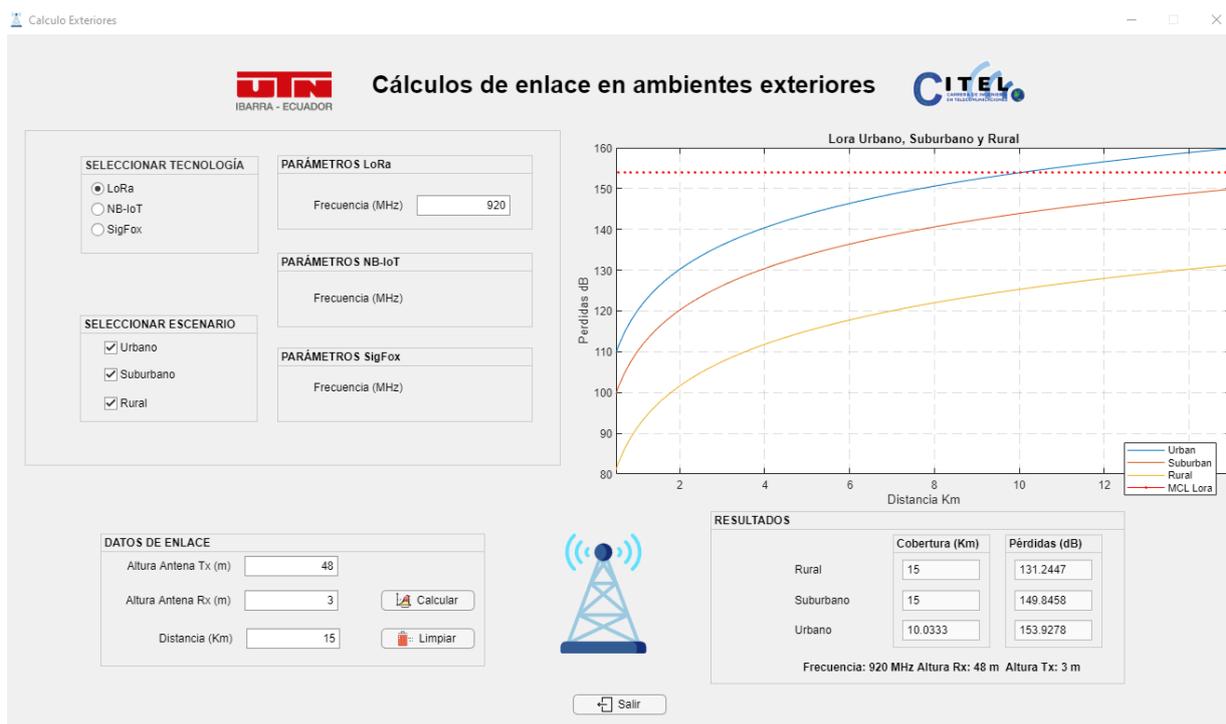
	Rango Inicial	Rango final	
Frecuencia Lora	902	920	Okumura - Hata
Frecuencia de NarrowBand	800	2400	150 -1500 MHz
Frecuencia de Sigfox	868	915	

Nota: Ingreso de datos en exteriores.

LoRa

A partir de los datos de la Tabla 22 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en exteriores., y con una frecuencia de 920 MHz la cual se encuentra dentro del rango de la banda ICM para el continente americano se procede a realizar la simulación la cual se muestra en la Figura 25 Enlace Exterior LoRa.

Figura 25 Enlace Exterior LoRa



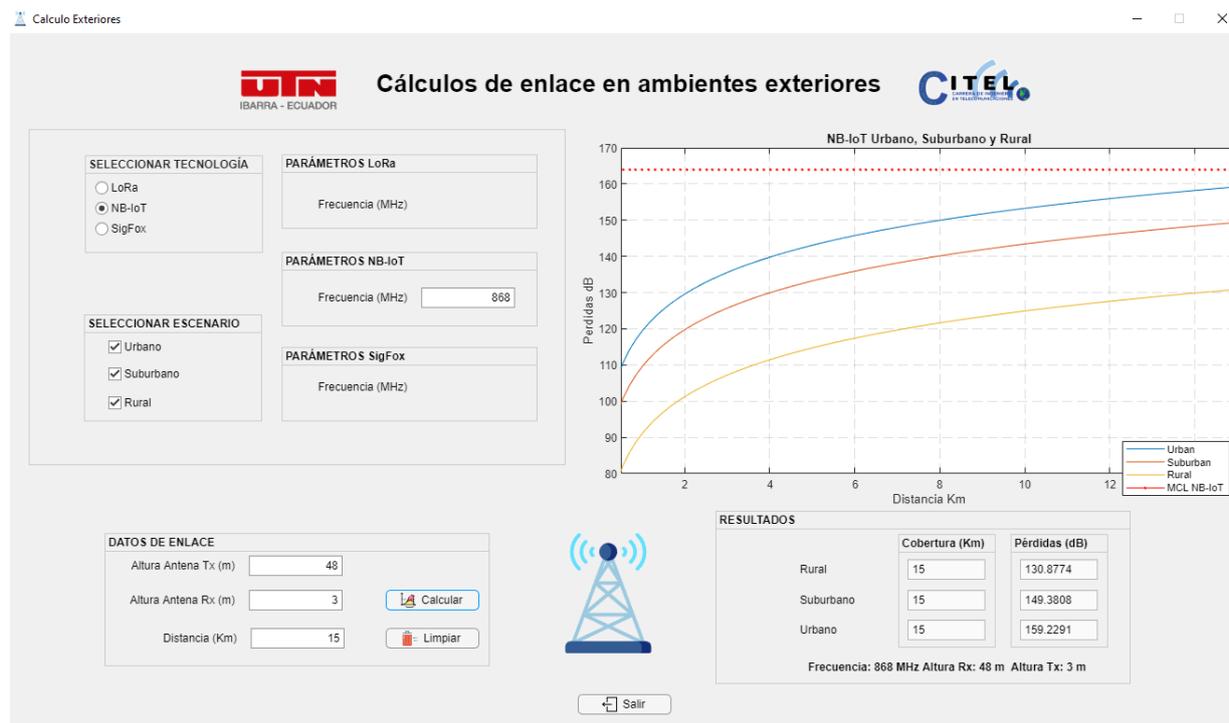
Nota: Realizado por el Autor

En la **Figura 25** Enlace Exterior LoRa se observa los resultados de la simulación de enlace para los tres entornos posibles, así: para una zona urbana se podría llegar a cubrir un máximo de 10.33 Km teniendo como pérdidas de propagación un total de 153.93 dB las cuales están muy cerca del MCL para LoRa, en tanto, en los ambientes suburbano y rural se logra cubrir el rango deseado teniendo 149.84 dB y 131dB respectivamente.

NB-IoT

NB-IoT trabaja mediante el uso de bandas licenciadas, por lo cual su rango de frecuencia es bastante amplio, sin embargo; por cuestiones de análisis se escogerá la frecuencia de trabajo de 868 MHz la cual está dentro del rango de operación del modelo Okumura-Hata.

Figura 26 Enlace Exterior NB-IoT



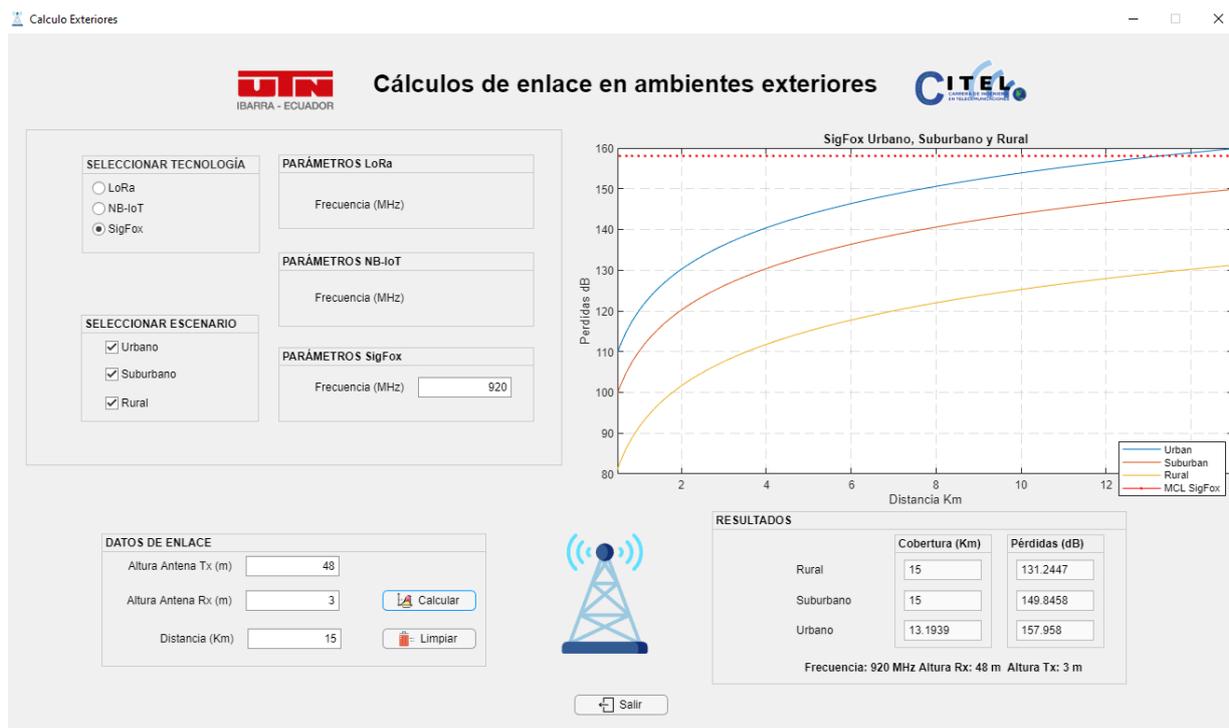
Nota: Realizado por el Autor

En el caso de NB-IoT se puede apreciar que en los tres escenarios analizados se logra alcanzar la cobertura deseada de 15 Km, sin embargo, el ambiente que presenta la mayor cantidad de pérdidas de propagación es el urbano con 159.22 dB siendo el que más se acerca al MCL de NB-IoT, en tanto los valores disminuyen en escenarios suburbanos y rurales.

Sigfox

Para el caso de Sigfox se usa la misma frecuencia de trabajo usada en LoRa ya que ambas tecnologías trabajan en la banda ISM.

Figura 27 Enlace Exterior Sigfox



Nota: Realizado por el Autor

Para el caso de Sigfox se logra apreciar que en entornos urbanos no se cubre la distancia requerida ya que la máxima posible es alrededor de los 13.19 Km con pérdidas de 157.9 dB los cuales están casi al límite del MCL para Sigfox, en tanto en entornos suburbanos y rurales si cubre la distancia requerida con pérdidas de propagación de 131.2 dB y 149.84 dB respectivamente.

Resultados Interiores

Para el análisis de pérdidas de propagación en interiores se lo realiza en base a los datos de la **Tabla 24** Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en interiores, en los cuales se detalla la frecuencia utilizada para cada una de las tecnologías.

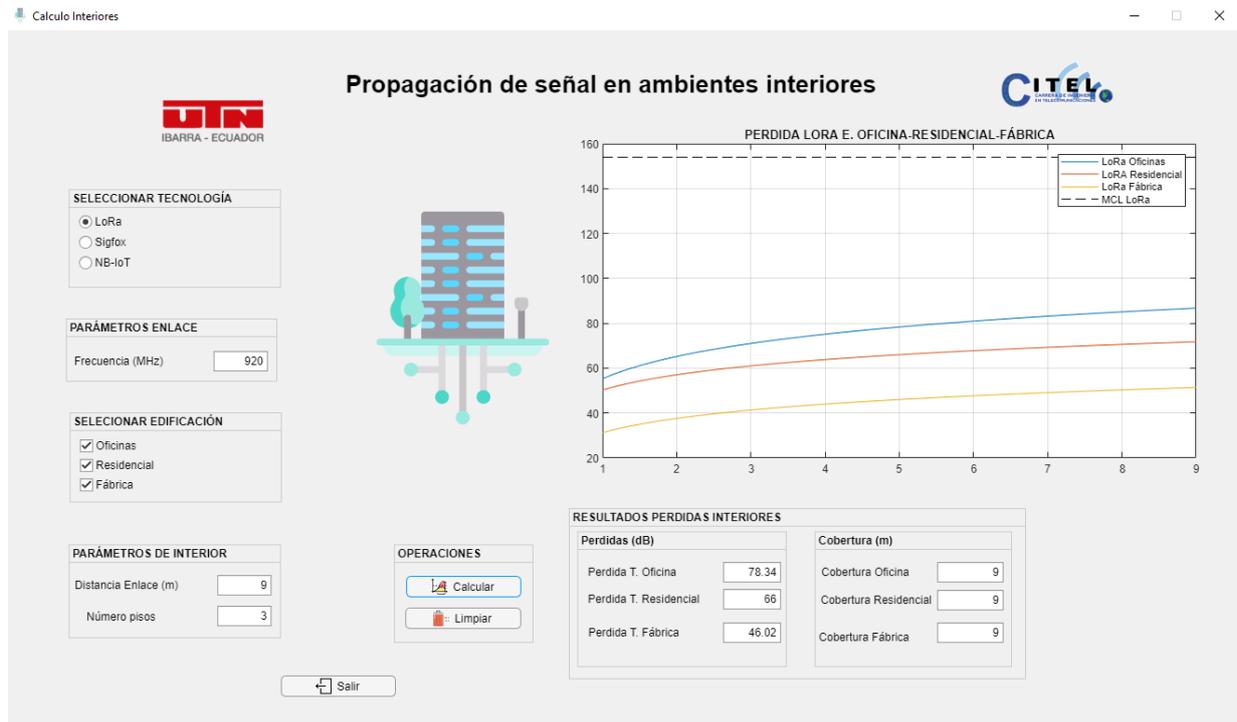
Tabla 24 Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en interiores

Parámetros	Descripción
Edificaciones	Fábricas, Oficinas, Residencial
Número de plantas	3
Tecnologías	Lora, Sigfox, NB-IoT
Frecuencia NB-IoT	800 MHz
Frecuencia Lora y Sigfox	920 MHz
Distancia Interior	9 m

LoRa

Para el caso de LoRa se trabaja con la misma frecuencia utilizada en la sección anterior mediante la cual se analizará los tres tipos de edificaciones presentes con un número de 3 plantas.

Figura 28 Enlace Interior Lora



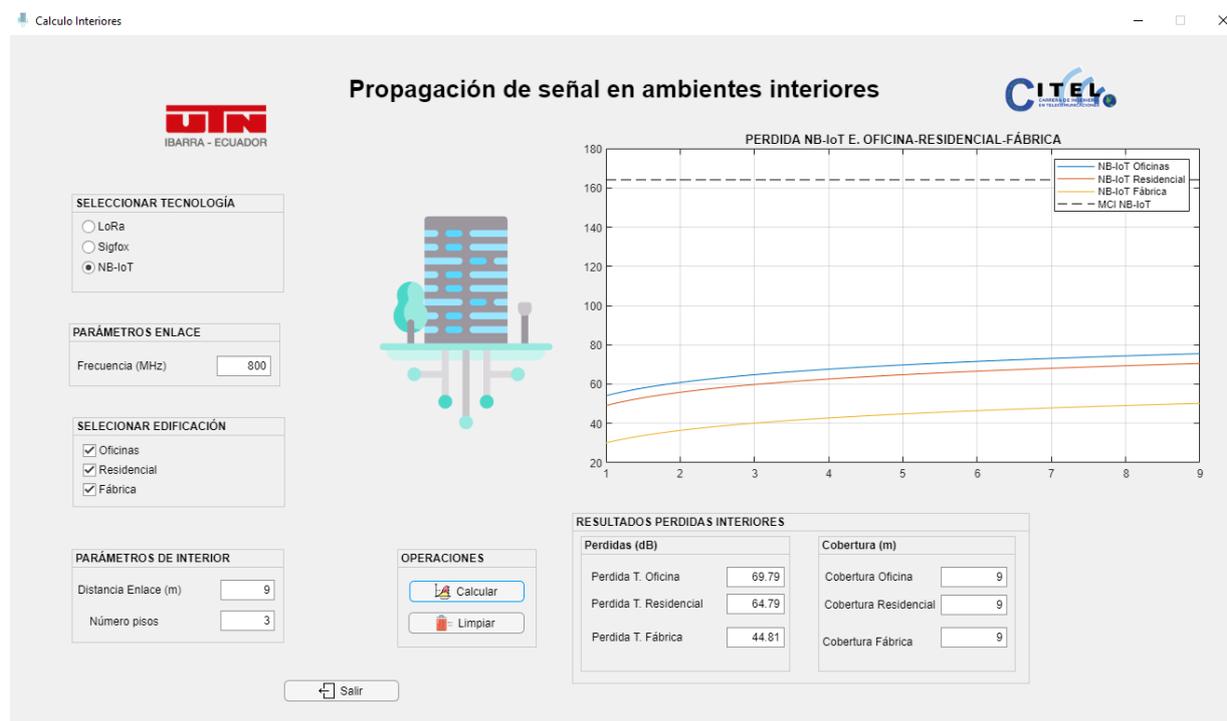
Nota: Realizado por el Autor

En la **Figura 28** Enlace Interior Lora se aprecia el cálculo de pérdidas de propagación para los tres tipos de edificación (oficinas, residenciales, fabricas), de las cuales se observa que las tres tecnologías cubren el área de estudio de 9 m, presentando una mayor cantidad de pérdidas de propagación en una edificación del tipo oficina, alrededor de 78 dB, en tanto para las edificaciones residenciales y fabricas se tiene 66 dB y 46 dB respectivamente.

NB-IoT

Para el caso de NarrowBand IoT (NB-IoT) se trabaja con una frecuencia de 800 MHz y los demás datos disponibles en la **Tabla 24** Datos de análisis para LoRa, Sigfox, NB-IoT en interiores.

Figura 29 Enlace Interior NB-IoT



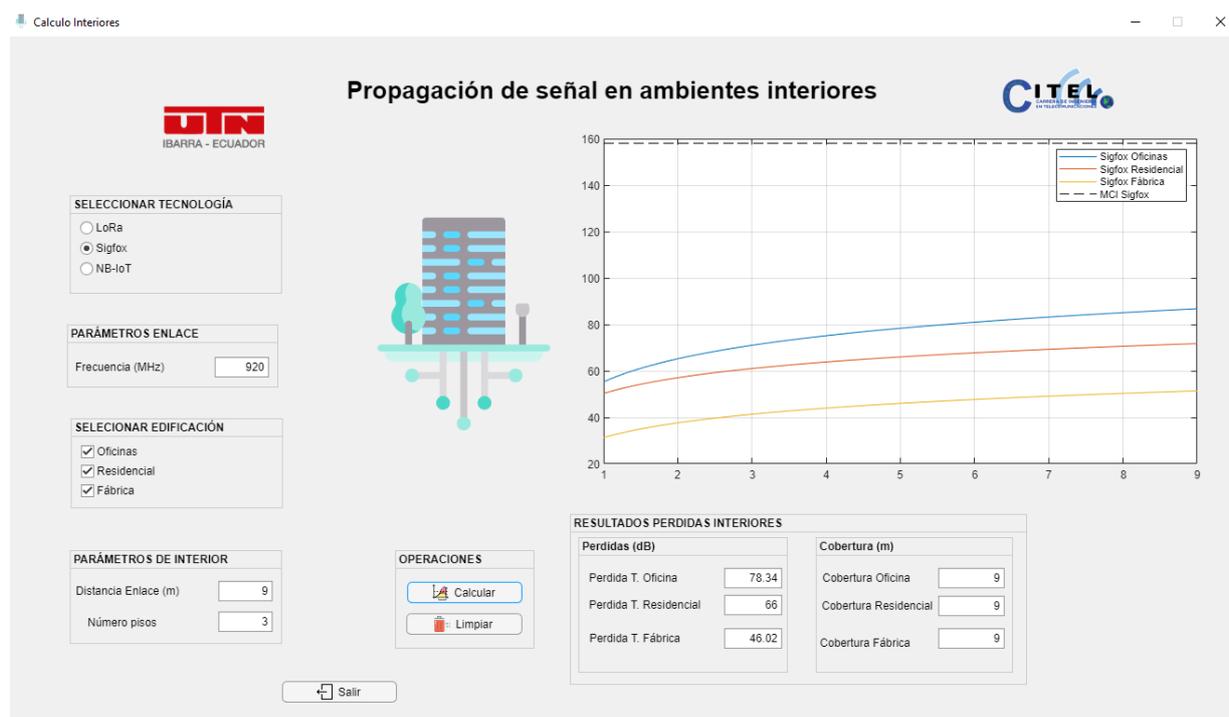
Nota: Realizado por el Autor

NarrowBand IoT de igual manera se alcanza la cobertura esperada de 9m con valores de pérdidas alrededor de 69 dB para oficinas, 64 dB para Residenciales, y 44 dB para Fábricas. Siendo el ambiente que más pérdidas presenta el de una oficina, como en la **Figura 29** Enlace Interior NB-IoT.

Sigfox

Para el caso de Sigfox se utiliza una frecuencia de 920 MHz, de igual manera correspondiente a la banda ISM al igual que LoRa.

Figura 30 Enlace interior Sigfox



Nota: Realizado por el Autor

Para el caso de Sigfox se logra cubrir el rango deseado con la con valores muy similares a los de LoRa en torno a los 78 dB para oficinas, 66 dB para residenciales, 46dB para fábricas. Cabe destacar que de las tres tecnologías analizadas la que mejor desempeño presenta es NB-IoT debido principalmente a la frecuencia utilizada ya que es la menor de las tres.

Resultados Finales

En la **Tabla 25** Resultados de las coberturas tanto en interiores como en exteriores se detallan los resultados obtenidos tanto en los escenarios exteriores e interiores para cada una de las tecnologías analizadas en base a las tablas de datos.

Tabla 25 Resultados de las coberturas tanto en interiores como en exteriores

Escenario	Tecnología	Cobertura	Pérdidas	Frecuencia
Exterior Urbano	Lora	10.03 Km	153.92 dB	920 MHz
	NB-IoT	15 Km	159.22 dB	868 MHz
	Sigfox	13.19 Km	157.95 dB	920 MHz
Exterior Suburbano	Lora		149.84 dB	
	NB-IoT	15 Km	149.38 dB	868 MHz
	Sigfox		149.84 dB	920 MHz
Exterior Rural	Lora		131.244 dB	
	NB-IoT	15 Km	130.87 dB	868 MHz
	Sigfox		131.24 dB	920 MHz
Interior Fabrica	Lora		46.02 dB	
	NB-IoT	9 m	44.81 dB	800 MHz
	Sigfox		46.02 dB	920 MHz
Interior Oficina	Lora		78.34 dB	
	NB-IoT	9 m	69.79 dB	800 MHz
	Sigfox		78.34 dB	920 MHz
Interior Residencial	Lora		66 dB	
	NB-IoT	9 m	64.79 dB	800 MHz
	Sigfox		66 dB	920 MHz

Como se aprecia en la **Tabla 25** Resultados de las coberturas tanto en interiores como en exteriores, en escenarios exteriores se aprecia la mayor disminución de cobertura en las tres tecnologías analizadas siendo la más afectada LoRa la cual únicamente cubre una distancia de aproximadamente 10 km con los parámetros establecidos, en cambio, en los otros dos entornos

se aprecia que se logra alcanzar la cobertura deseada con valores muy cercanos al límite de MCL en las zonas suburbanas y en las rurales muy por debajo de estos mismos.

Para el caso de escenarios interiores se tiene el menor número de pérdidas al trabajar con NB-IoT a una frecuencia de 800 MHz, sin embargo tanto LoRa como obtienen similar número de pérdidas, sin embargo se debe tomar en cuenta que estos datos son únicamente de la zona interior y para un mejor resultado se le debe añadir las pérdidas generadas en el exterior y el total compararlo con los valores de MCL de cada tecnología para así lograr obtener los valores totales de cobertura y pérdidas para las distintas combinaciones posibles de los escenarios.

Manual de procedimientos

La propuesta de generar un documento que valide la Interfaz realizada se muestra a detalle en el Anexo 2. Este documento contiene paso a paso los ítems y funcionalidad de la Interfaz; además contiene una guía de escenarios de prueba en ambientes exteriores e interiores alojados en el Campus de la UTN en el Anexo 1. La portada del Manual de Procedimientos está dada por la figura 31.

Figura 31 Portada de Manual de procedimientos.



Nota: Realizado por el Autor

El documento consta de directrices y uso de la herramienta así:

Introducción, donde se explica el origen de generar una aplicación en torno a evaluar dos parámetros de enlace en tecnologías inalámbricas como LoRa, Sigfox y Narrowband-IoT. Además se aborda en términos generales en modelo y recomendaciones internacionales que validan el cálculo de enlace.

Objetivo del manual, que dispone a la comunidad estudiantil de la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones y en general a carreras de ingeniería de una herramienta para simular propagación de enlace en escenarios propuestos y con tecnologías basada en banda de espectro libre como LoRa y Sigfox, además de la tecnología basada en banda de espectro licenciado.

Instructivo de uso del software, que explica el procedimiento a seguir en el uso de la Aplicación y los formatos en que se registra su uso. El instructivo se orienta a la predicción de pérdidas y propagación de tecnologías LPWAN.

- a) **Alcance**, dado el contexto de estudio, el alcance de este manual es simular entornos exteriores e interiores, una vez que se definan parámetros como altura de antenas, frecuencia de operación, distancias, pisos; con enfoque en las tecnologías LoRa, Sigfox, Narrowband-IoT en contexto cobertura y pérdidas por propagación.
- b) **Referencias**, que son documentos y páginas oficiales de cada tecnología, así como las recomendaciones para el cálculo de su propagación.
- c) **Responsabilidades**, que encajan en el perfil de técnico docente de laboratorio a fin a la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Descripción de instrucciones, consiste en detallar el procedimiento de uso de la Aplicación, en contexto selección, edición, borrado, ejecución, graficación.

Formato de suso de aplicación, consiste en un formato de registro de uso del software para tecnologías LPWAN, en entornos de laboratorio.

Diagramas de flujo entornos exteriores e interiores, que muestran a detalle las ventanas de trabajo de la aplicación.

Simbología ANSI para el diagrama de flujo, que dirige el diagrama realizado para cada tipo de escenarios.

El documento final es expuesto en los anexos de este proyecto. Una vez presentada la interfaz de simulación y el manual de procedimientos al laboratorio de Electrónica en la Carrera de Telecomunicaciones, se sugiere realizar una socialización que consta de una breve explicación del software MATLAB, con licencia educativa y el uso de la interfaz. Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones de este proyecto de titulación.

CONCLUSIONES

Cada tecnología tiene su lugar en el mercado de la IoT. Sigfox y LoRa son más adecuados al definir el parámetro costo, además proporcionan alta cobertura, tasa de comunicaciones poco frecuentes y baterías de duración muy larga. En otro sentido, Narrowband-IoT tiene ventaja al usar la infraestructura de LTE para su despliegue, siempre que los usuarios estén dispuestos a pagar por una latencia extremadamente baja y muy alta calidad de servicio.

Al resolver el parámetro módulo de red, la propuesta de LoRa sugiere mejores ventajas de compatibilidad con redes de sensores o Gateway de comunicación; por su parte Sigfox no muestra gran presencia en Latinoamérica. Sobre NarrowBand IoT resulta un reto el usar los módulos o su red en sí, puesto que el costo debe representar una causa fundamentada.

Las aplicaciones de IoT implementadas por LoRa y Sigfox gestionan mayor cantidad de escenarios exteriores e interiores puesto que la infraestructura considerando el backhaul como torres, paneles solares, baterías, estación base y estaciones finales calcula un valor menor al de infraestructura de Narrowband. Por su parte, Narrowband es una tecnología que puede actuar con mayor eficiencia que LoRa y Sigfox en escenarios de pronta respuesta y más largo alcance para cubrir algún servicio de red celular.

La metodología propuesta para documentar el desarrollo del proyecto encajó directamente con cada actividad propuesta. Tomando en cuenta que la Guía de PMBOOK es flexible para cada caso, se aplicó a detalle la mayoría de las fases, desde planificación a evaluación. Para la metodología experimental, el identificar variables, generar escenarios de simulación y tomar decisiones facilitó el desarrollo de la interfaz.

El modelo matemático para evaluar la propagación de señales en diferentes escenarios que mejor se acopló a las tecnologías IOT fue el modelo de OKUMURA – HATA porque cumple con el rango de estudio de 500 MHz a 1500MHz y se adapta en escenarios urbano, suburbano y rural. Por otra parte, para evaluar escenarios internos como residencias, oficinas, fábricas, sin tener línea de vista, la Recomendación R-1238-10 proporcionada por ITU validó los parámetros de ingreso de la Interfaz adecuadamente.

Una vez simulado los escenarios dados por características típicas de la Recomendación, y para evidenciar su validez, se adaptó casos de uso en los campus de la UTN así: sede principal, hospital antiguo, granjas experimentales de Chaltura y San Roque; donde los resultados para exteriores en términos de atenuación y cobertura comprueban como mejor opción a Narrowband IoT, seguido de LoRa y finalmente Sigfox.

Narrowband- IoT al trabajar mediante una banda de frecuencia licenciada está sujeta a menores interferencias, propias del entorno, a las cuales si están expuestas tecnologías como LoRa y Sigfox.

RECOMENDACIONES

En el presente proyecto de diseño, se tornó en parámetros de cobertura y atenuación, por lo que se recomienda considerar las distancias mayores a 1 Km para aprovechar la capacidad de las tecnologías las cuales son capaces de cubrir distancias mucho mayores.

El verificar la compatibilidad de módulos en cada tecnología es fundamental, porque, tanto al diseñar o implementar, los resultados serán más precisos con las frecuencias de operación adecuadas para cada ambiente.

Revisar las normativas del uso del espectro radioeléctrico ya que pueden existir ciertas cláusulas en torno a los ciclos de trabajo de cualquier tecnología; así como parámetros de velocidad, seguridad dentro del entorno nacional que deben ser cumplidas.

En el caso de Narrowband-IoT se puede trabajar con frecuencias de hasta 2600 MHz sin embargo el modelo Okumura-Hata recomienda trabajar con frecuencias que estén dentro del rango de 500 MHz a 1500 MHz.

La interfaz permite realizar pruebas de cobertura & pérdidas de propagación en otros escenarios, siempre que se estime la altura de antenas y distancia entre ellas; por lo que es recomendable aprovecharla para trabajos de investigación futuros.

La propuesta queda abierta para desarrollar en ambientes públicos o privados según la necesidad de cobertura. Además que los ambientes de simulación podrían implementarse a entorno real con un presupuesto asignado.

Bibliografía

- 3GPP. (20 de septiembre de 2017). *Release 14 - Mobile BroadBand Standard*. Obtenido de <https://www.3gpp.org/release-14>
- Obtenido de http://www.3gpp.org/images/presentations/2016_11_3gpp_Standards_for_IoT.pdf
- Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- Obtenido de <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>
- Abdelmoumen. (2019). *IoT Protocolos*.
- Acevedo , A., Linares, C., & Cachay, O. (2018). Investigación en la acción. Un ejemplo de estudio experimental en el mercadeo de servicios. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*.
- AlFaIoT. (2018). *¿Qué es LoRa?* Obtenido de <https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/que-es-lora-2>
- Alliance, L. (2020). *LoRa world coverage* . Obtenido de LoRa Alliance: www.lora-alliance.org/
- Business Insider. (19 de Julio de 2018). *How the Internet of Things will transform consumerism, enterprises, and governments over the next five years*.
- Carvalho, R. N. (2020). *Estudo sobre aplicações de IoT na área médica*. Obtenido de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204169>
- Cascajo, M. (31 de octubre de 2018). *Crecimiento de IoT*.
- CEPAL, N., & Cooperation, G. A. for I. (2018). *Mercado digital regional: Aspectos estratégicos*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/43476>
- Obtenido de http://oa.upm.es/51978/1/PFC_SERGIO_VERA_ANDREU_2018.pdf
- Obtenido de <https://addi.ehu.es/handle/10810/23420>
- Eggy, Finochietto, Micheletto, & Santos. (2020). *Internet de las cosas como bien común*.
- Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/1902.09455.pdf>
- FRONTIERSIN. (Julio de 2020). *COVID-19: Papel de la comunicación inalámbrica, redes y tecnologías de detección para la respuesta rápida de la pandemia*. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/research-topics/14199/covid-19-role-of-wireless-communication-networking-sensing-technologies-for-rapid-pandemic-response#overview>
- Girón, N., & Lopez Hurtado, M. (2020). *Selección de tecnologías LPWAN para la implementación de un sistema IoT aplicado a la lombricultura*. Obtenido de <http://doi.org/10.22490/25904779.4170>
- Gradiant. (Noviembre de 2018). *NB-IoT, la revolución del mundo conectado*. Obtenido de <https://www.gradiant.org/blog/nb-iot-revolucion-mundo-conectado/>
- Idea. (2018). *Ideas para matrices de valoración*. Obtenido de https://multimedia.uned.ac.cr/pem/recursos_pace/c-instrumentos-matrices-valoracion.html
- IOT FACTORY. (2020). *Visión general de las redes IOT*. Obtenido de Visión general de las redes IOT: <https://iotfactory.eu/iot-knowledge-center/overview-of-iot-networks/>
- Obtenido de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/64286>

ITU. (2020).

Laina Mingarro, M. (2018). *Aplicación para transmisión de dtos en IoT*.

Obtenido de <http://arxiv.org/abs/1807.05602>

Lauridsen, M. K. (2016). *Coverage and capacity analysis of LTE-M and NB-IoT in a rural area. IEEE Vehicular Technology Conference*. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/VTCTFall.2016.7880946>

Liberg, O. & -P. (2018). The Competitive Internet of Things Technology Landscape.

Liberg, O., Sundberg, M., Wang, Y.-P., Bergman, J., & Sachs, J. (2018). *The Competitive Internet of Things Technology Landscape*.

Obtenido de <http://arxiv.org/abs/2010.00491>

Obtenido de <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>

Obtenido de <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27666/Hemjal.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Miller, R. (s.f.). *LoRa Security. Building a secure lora solution*.

Montes Valencia, A. E. (2019). *Telemetría a través de redes de área extensa de Baja Potencia (LPWA) y en coexistencia con el internet de las cosas (IoT)*. . Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/16025>

Oracle. (2018). *Características de Oracle Internet of Things*. Obtenido de Características de Oracle Internet of Things: <https://www.oracle.com/co/solutions/internet-of-things/features.html>

Paguayo. (2019). *Qués es NB-IoT. MCI Capacitación*. Obtenido de <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/27/que-es-nb-iot/>

PANDORAFMS. (20 de Septiembre de 2018). *LPWAN: introducción al protocolo de comunicaciones de IoT*. Obtenido de <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-lpwan/>

Peralta, M. C. (2018). *MODELOS DE COMUNICACIÓN, DESAFÍOS Y APLICACIONES*.

PMI. (2008). *Programe Management Body of Knowledge, del Project Managment Institue*.

Quimbita, A., & Salvador, C. (2018). *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109791/Moya - Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos.pdf?sequence=1&isAll>

Radioshuttle. (2020). *Radioshuttle*. Obtenido de Factores de dispersión SF7 - SF12: <https://www.radioshuttle.de/es/medias-es/informaciones-tecnicas/nota-sobre-los-factores-de-dispersion-sf7-y-sf12/>

Rashmi Sharan Sinha, Y.-H. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *Science*, 21.

Ray, B., & Links Labs. (26 de Junio de 2018). *What Is LoRa? A Technical Breakdown*. Obtenido de <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>

Rimbau-Gilabert, E. (2019). *Digitalización y bienestar de los trabajadores*. Obtenido de IUSLabor. Revista d'anàlisi de Dret del Treball.: <https://doi.org/10.31009/IUSLabor.2019.i02.01>

Saari, M. M. (2018). LoRa - A survey of recent research trends. 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics. 21.

- Sakir, S. (2019). IoT Security: - Threats, Security Challenges and IoT Security Research and Technology Trends. *IEEE*.
- SIGFOX. (2020). *SIGFOX TECHNOLOGY*. Obtenido de SIGFOX TECHNOLOGY: <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>
- Obtenido de <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- smart, A. m., & Hunt, D. (2018). *LoRa & 3GPP. Combined strategy for a covering all IoT use cases*. Obtenido de https://docbox.etsi.org/workshop/2016/201611_m2miotws/00_workshop/s07_lowpowertechno/actiliy_hunt.pdf
- Techplayon. (2018). *Maximum Coupling Loss (MCL) and Maximum Path Loss (MPL) - Techplayon*. . Obtenido de <http://www.techplayon.com/maximum-coupling-loss-mcl-and-maximum-path-loss-mpl/>
- Telefónica. María Cascajo Sastre. (31 de octubre de 2018). Obtenido de Previsiones de crecimiento de IoT: <https://empresas.blogthinkbig.com/previsiones-de-crecimiento-de-iot/>
- The IoT Forecast Book. (2018). *The IoT Forecast Book*. Obtenido de https://store.businessinsider.com/products/the-iot-forecast-book?IR=T&itm_source=businessinsider&itm_medium=content_marketing&itm_campaign=report_teser&itm_content=full_report_text&itm_term=store_text_link-iot-forecast-book-2018-7&vertical=connectivity#!
- Thomas, T. (2019). *Path loss Determination Using Hata Model and Effect of Path loss in OFDM*. Obtenido de International Journal.
- Tornero Viñas, A., & Pérez Roca, L. (08 de 11 de 2018). *GRADIANT*. Obtenido de NB-IoT, la revolución del mundo conectado: <https://www.gradiant.org/blog/nb-iot-revolucion-mundo-conectado/>
- Obtenido de <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3126973.3126980>
- WPECWORKS, O. (2019). *Lightweight M2M (LWM2M)*. Obtenido de <https://omaspecworks.org/what-is-oma-specworks/iot/lightweight-m2m-lwm2m/>
- Zara, L. (2017). *Diferencia entre zona rural y zona urbana*. Obtenido de <https://www.diferenciador.com/zona-rural-y-zona-urbana/>

Anexos

Anexo 1 – Casos de uso UTN

Anexo 2 – Manual de procedimientos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

INSTITUTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CASOS DE USO PARA ESCENARIOS EXTERIORES (URBANO, SUBURBANO, RURAL) E INTERIORES (RESIDENCIALES, OFICINAS, FÁBRICAS) PARA PROPAGACIÓN DE TECNOLOGÍAS LPWAN: LORA, SIGFOX Y NARROWBAND (NB-IoT)

Uso en Laboratorio de Electrónica / Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones

PINTO ERAZO ALEJANDRA

NOVIEMBRE 2020

CASOS DE ESTUDIO

Se denomina caso de estudio al planteamiento de un escenario con determinadas condiciones para simular y/o desarrollar. Una vez planteada la propuesta de Simulación a través de la Interfaz Gráfica, se plantean los siguientes escenarios y se resuelven los resultados generados.

Casos de estudio Escenarios Exteriores

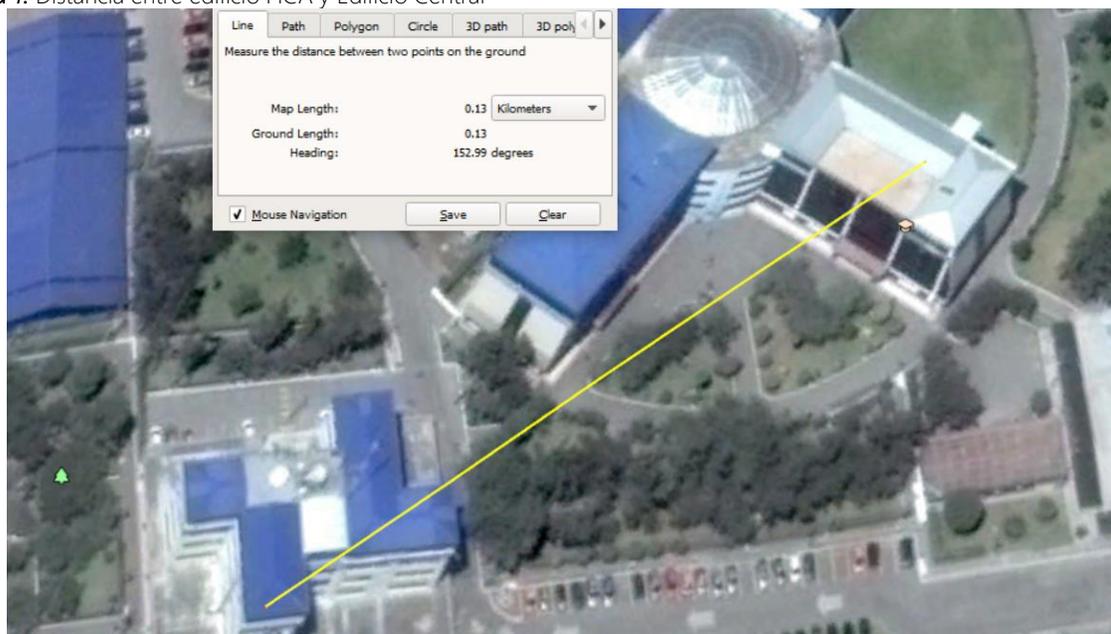
Se analiza la posible implementación en escenarios exteriores, tanto para entornos urbanos, suburbanos, y rurales, por lo que se presenta escenarios a partir de los ambientes de la Universidad Técnica del Norte, en los cuales se podría implementar la infraestructura para el soporte tanto de LoRa o Sigfox.

El análisis se centra en estas tecnologías debido al espectro de frecuencias en el que trabajan, las cuales son de acceso libre y no generan gastos extras. De esta manera únicamente se debe considerar el costo de los módulos a usar y en caso de ser necesario algún soporte extra para las antenas.

Caso 1: Escenario Urbano

Para este tipo de escenario se planta un enlace desde la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA¹) hasta una distancia de aproximadamente 0.13 Km en la cual se encuentra ubicado el Edificio Central de la Universidad tal y como se muestra en la *Figura 1*.

Figura 1: Distancia entre edificio FICA y Edificio Central

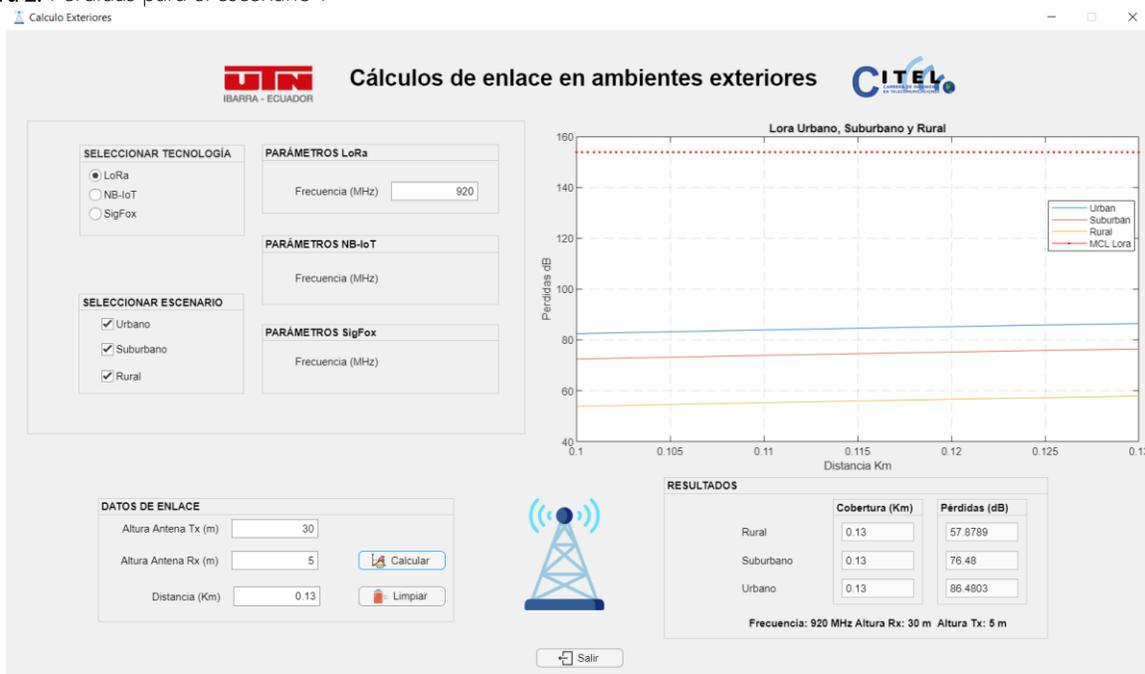


¹ FICA – Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

En este sentido se plantea una altura alrededor de 30 mts para la antena de transmisión ubicada en la azotea de la FICA y una altura en torno a 5 mts para la antena de recepción ubicada en la parte externa de la segunda planta del edificio central. Cabe recalcar que estos valores son aproximaciones por lo que están sujetas a variaciones.

Con los datos propuestos se procede a ingresarlos en la interfaz mediante la cual se tiene los siguientes resultados.

Figura 2: Pérdidas para el escenario 1



Para este caso de acuerdo con la *Figura 2* se tiene un valor de pérdidas en torno a los 86 dB para el tipo de entorno utilizado el cual está muy por debajo del valor de MCL tanto de Lora y de Sigfox por lo que en enlace se considera viable con una frecuencia de trabajo de 920 MHz.

Tabla 1: Comparación tecnologías escenario urbano.

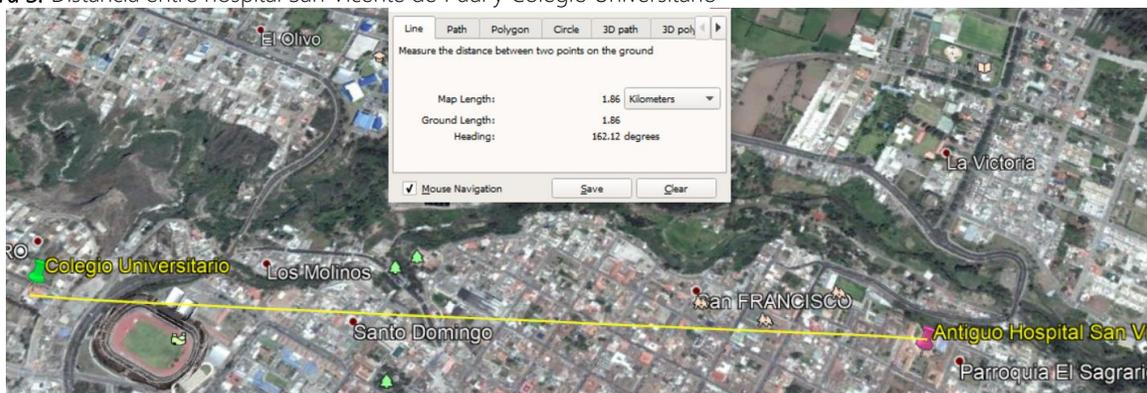
Escenario Urbano			
	Pérdidas	Cobertura	Frecuencia
LoRa	86.25 dB	0.13 Km	920 MHz
Sigfox	86.25 dB	0.13 Km	920 MHz
NB-IoT	84.90 dB	0.13 Km	800 MHz

En la *tabla 1* se muestran los valores de pérdidas de cada una de las tecnologías, tanto LoRa como Sigfox tienen el mismo valor de pérdidas debido a que trabajan en la misma frecuencia, en tanto NB-IoT presenta el valor más bajo ya que su frecuencia de operación es menor. Además, se aprecia que con cualquiera de las tres se podría cubrir la distancia requerida.

Caso 2: Escenario suburbano

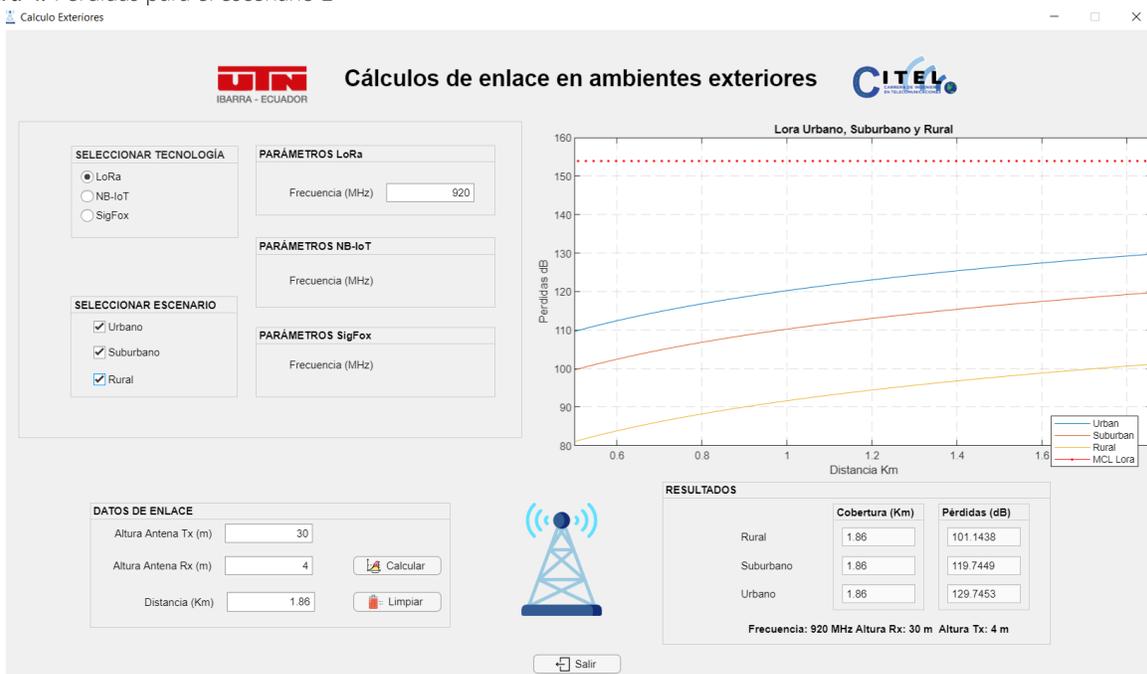
Para el caso del escenario suburbano se plantea un enlace entre la zona del antiguo Hospital San Vicente de Paul con el Colegio Universitario ubicado en la calle Ulpiano de la Torre, con distancia de 1.86 Km entre ellos como se observa en la *figura 3*. Se considera al antiguo hospital San Vicente como el punto de inicial con una altura mínima de 30m para la antena de Transmisión y al Colegio Universitario con una altura de 4 m para la antena de recepción.

Figura 3: Distancia entre hospital San Vicente de Paul y Colegio Universitario



Se procede a graficar las pérdidas en relación con la distancia mediante el uso de la interfaz y se obtienen los resultados de la *figura 4*:

Figura 4: Pérdidas para el escenario 2



Como se aprecia en la *figura 4* el valor de pérdidas en entorno suburbano alcanza un valor de 119.74 dB por lo que se considera que el enlace es viable a pesar de la gran distancia de separación.

Tabla 2: Comparación tecnologías escenario Suburbano

Escenario Suburbano			
	Pérdidas	Cobertura	Frecuencia
LoRa	119.74 dB	1.86 Km	920 MHz
Sigfox	119.75 dB	1.86 Km	920 MHz
NB-IoT	118.69 dB	1.86 Km	800 MHz

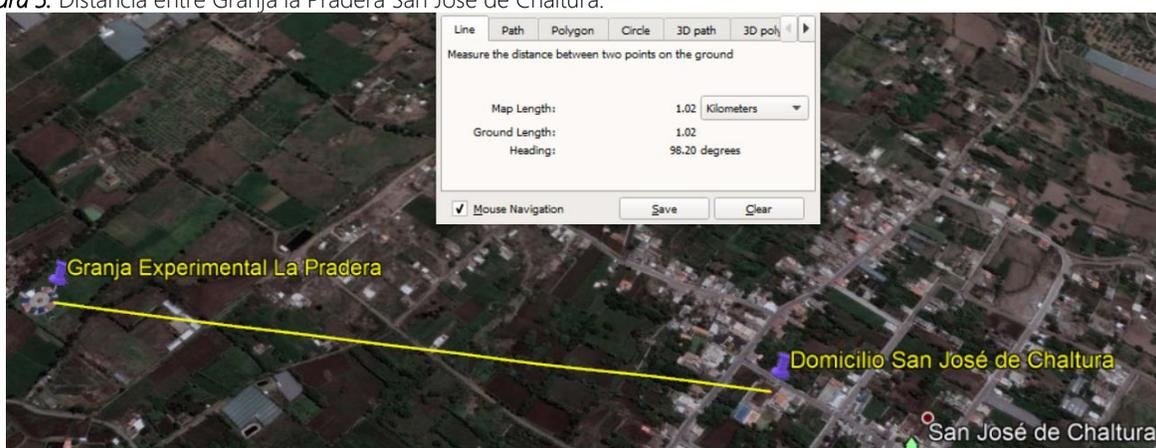
En la *tabla 2* se muestran las pérdidas de cada una de las tecnologías teniendo valores alrededor de 119 dB tanto para LoRa como para Sigfox debido a la frecuencia de operación, de igual manera que en la sección anterior se logra cubrir el rango esperado.

Caso 3: Escenario Rural

Para el escenario rural se tiene en consideración a la Granja la Pradera ubicada en la vía al Rancho alrededor de San José de Chaltura, al igual que un domicilio ubicado en la misma zona de San José de Chaltura alrededor de 1.02 Km de distancia de la granja.

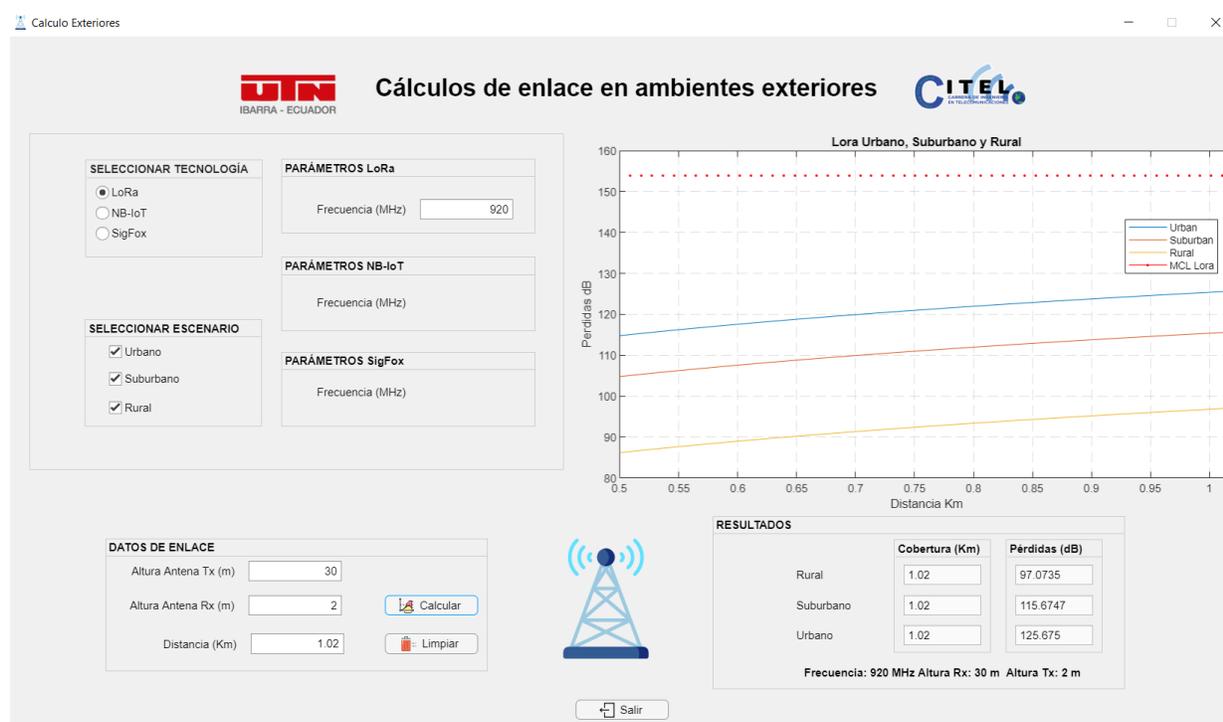
Se plantea que la ubicación del transmisor sea en la granja ya que desde la misma se puede obtener información de a través de un sin número de sensores tanto de humedad, temperatura, presión, etc. La cual puede ser enviada a través del enlace propuesto, para ello se plantea la altura mínima de la antena de 30 m y en cambio para el receptor ubicado en San José de Chaltura una altura de la antena de recepción en torno a los 2 m.

Figura 5: Distancia entre Granja la Pradera San José de Chaltura.



Una vez planteados los datos, se ejecuta la simulación, se obtienen los resultados de la *figura 6* y se evalúa el comportamiento.

Figura 6: Pérdidas en el escenario 3



Como se aprecia en la *figura 6* en el entorno urbano se tiene la menor cantidad de pérdidas con apenas 97 dB lo cual posibilita la extensión del enlace en caso de requerirlo, o incluso considerar ubicar los equipos receptores en el interior, utilizando la segunda ventana de la interfaz para medir las pérdidas correspondientes.

Tabla 3: Comparación de tecnologías entorno rural.

Escenario Rural			
	Pérdidas	Cobertura	Frecuencia
LoRa	101.14 dB	1.02 Km	920 MHz
Sigfox	101.14 dB	1.02 Km	920 MHz
NB-IoT	100.31 dB	1.02 Km	800 MHz

Para el entorno rural se obtiene que con las tres tecnologías se puede cubrir el rango especificado; en cuanto a las pérdidas, la que menor cantidad presenta por una diferencia mínima es NB-IoT, esto debido a la frecuencia de operación en tanto LoRa y Sigfox están igualadas con un valor de 101.14 dB.

Tabla 4: Datos de los tres escenarios propuestos

	Punto de transmisión	Punto de recepción	Distancia	Altura Tx	Altura Rx
Escenario Urbano	Edificio FICA	Edificio Central	0.13 Km	32 m	5
Escenario Suburbano	Hospital San Vicente	Colegio Universitario	1.86 Km	30 m	4
Escenario Rural	Granja La Pradera	San José de Chaltura	1.02 Km	30 m	2

En la *tabla 4* se presentan los datos de cada uno de los casos propuestos. Se debe mencionar que las distancias fueron medidas en base a Google Earth y son aproximaciones muy precisas de los datos reales: Los valores de altura de las antenas de transmisión sugeridos se tomaron los valores mínimos de acuerdo con el modelo de Okumura-Hata.

Casos de estudio Escenarios Interiores

Se expone diversos casos de estudio en escenarios interiores como edificaciones de oficinas, edificios residenciales y al interior de una fábrica. Estos entornos están enfocados en el campus de la Universidad Técnica del Norte en la ciudad de Ibarra utilizando las tecnologías de LoRa, Sigfox o Narrowband según la necesidad que tenga la edificación en el cual se implante cualquiera de las tecnologías ya mencionadas.

Las tecnologías LPWAN permiten transmitir datos a largas distancias con un consumo de energía bajo y por ende alta durabilidad de los dispositivos implementados, tanto Lora como Sigfox trabajan en un espectro de frecuencia libre mientras que Narrowband trabaja en frecuencia licenciada por lo cual al instante de realizar instalación existirá variaciones en el tema económico. Sin embargo, a través del software de simulación realizado en MATLAB permitirá conocer que tecnología es más eficiente en los escenarios de estudio.

Caso 4: Escenario Edificios oficina/residencial /fábrica con tecnología de espectro libre

El caso de estudio se encuentra enfocado en cuanto a edificios de oficinas y edificios residencial por lo cual se planteará uso de dos tecnologías de espectro libre como Sigfox y LoRa para determinar qué tipo de tecnología es más apropiada al Edificio de estudio. El edificio de oficina se determinó que sería apropiado el edificio central del Campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte como la *figura 7*, el edificio residencial se tomará en consideración el edificio de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas como la *figura 8* y el entorno de fábrica será el taller de mantenimiento automotriz situados en el mismo campus como la *figura 9*.

Figura 7: Edificio Central Universidad Técnica del Norte (Edificio Oficinas)



Figura 8: Edificio Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (Edificio Residencial)



Figura 9: Edificio Taller Automotriz (Fábrica)



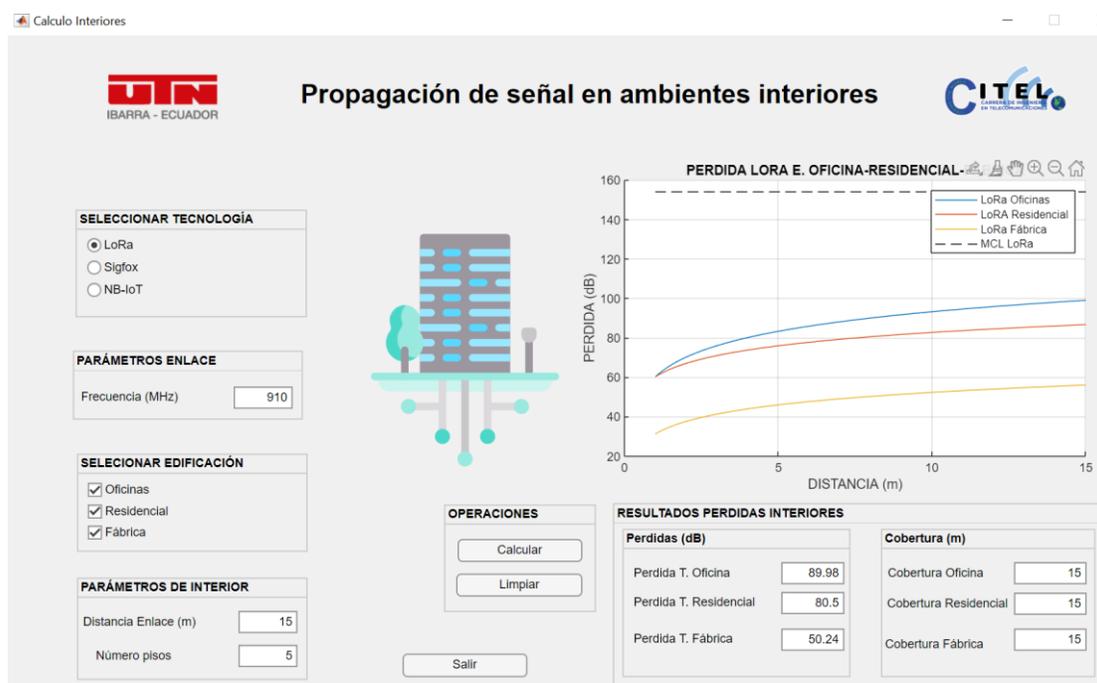
Para los tres entornos, tomando en cuenta las tecnologías de espectro libre como LoRa y Sigfox se solicitan los siguientes parámetros, como la *tabla 1*.

Tabla 5: Datos aproximados de los edificios según Recomendación ITU espectro libre

PARÁMETROS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	EDIFICIO FÁBRICA
DISTANCIA ENLACE (M)	15	15	15
# PLANTAS	5	5	0
PENETRACIÓN DEL SUELO (DB)	$9+5(n-1)$	$9+5(n-1)$	0

A continuación se muestra el resultado con los parámetros iniciales, como en la *figura 10*, para la tecnología LoRa.

Figura 10: Simulación de la tecnología LoRa en espacio de interiores



En la *figura 10* se denota la variación que existe en un enlace con la tecnología LoRa entre diversas edificaciones con los parámetros aproximados dentro del entorno del Campus Universitario, la tecnología LoRa en el interior de una fábrica contiene menor valor de pérdida de potencia de la señal debido a que al interior de una fábrica no existe el factor de penetración del suelo el cual favorece de manera positiva hacia los enlaces dentro de la fábrica mientras que en edificio de oficinas la tecnología LoRa en comparación de los demás edificios no es tan favorable su uso .

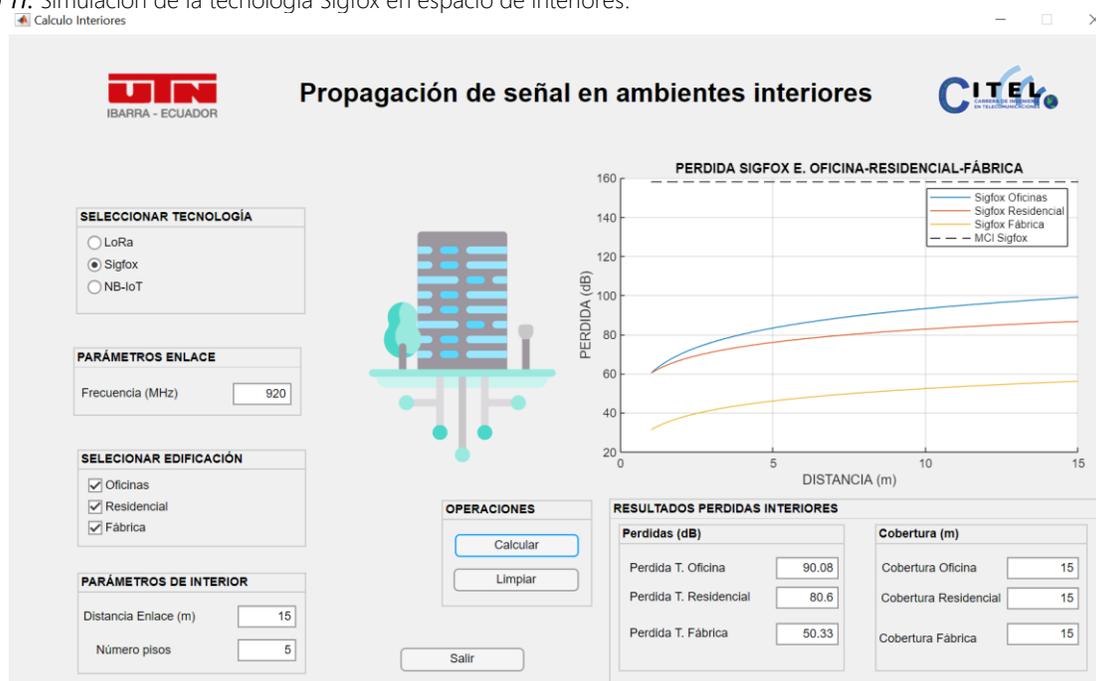
Los resultados para LoRa en interiores se resumen en la *tabla 6*, tanto en cobertura como pérdidas de propagación.

Tabla 6: Comparación de edificios con respecto a sus resultados del enlace LoRa

RESULTADOS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
PÉRDIDA (DB)	80.5	89.98	50.24
COBERTURA (M)	15	15	15

En la *figura 11* se presenta los resultados de la simulación para escenarios Sigfox.

Figura 11: Simulación de la tecnología Sigfox en espacio de interiores.



La tecnología Sigfox igual que la tecnología LoRa al usar bandas de frecuencia libres y a su vez de usar el modelo matemático impartido por la ITU no existe una gran diferencia entre ambas tecnologías por lo cual se establecería la diferencia entre estas a través de los precios de los módulos de una tecnología con respecto a la otra. De igual manera en la presente gráfica resalta el valor de pérdida dentro de la fábrica en comparación de las demás edificaciones.

Tabla 7: Comparación de edificaciones con respecto a sus resultados del enlace Sigfox.

RESULTADOS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
PÉRDIDA (DB)	80.6	90.08	50.33
COBERTURA (M)	15	15	15

Los resultados expuestos en la *tabla 7* en comparación con la tecnología LoRa se denota una baja variación en cuanto a sus resultados del enlace por lo que se determina que ambas tecnologías podrían ocuparse en estos ambientes sin ningún tipo de complicación con respecto a pérdidas.

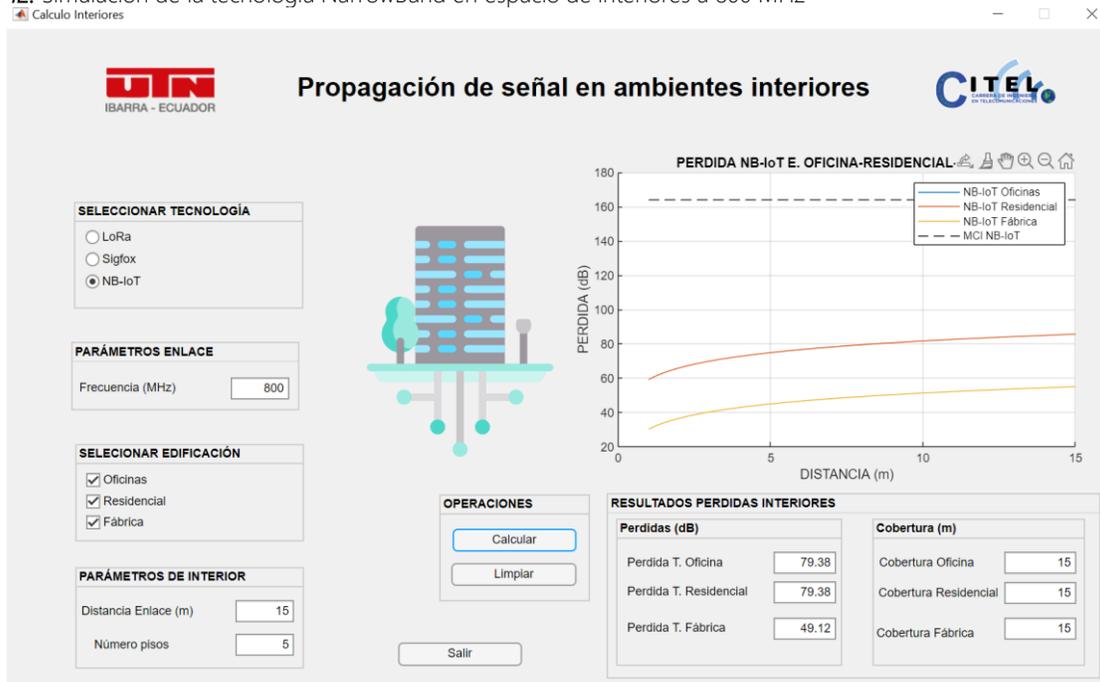
Caso 5: Escenario Edificios oficina/residencial /fábrica con tecnología de espectro licenciado

El caso de estudio se encuentra enfocado en cuanto a edificios de oficinas y edificios residencial por lo cual se planteará uso de dos tecnologías de espectro licenciado como NarrowBand para determinar cómo actúa la tecnología en cuestión dentro del Edificio de estudio. El edificio de oficina se determinó que sería apropiado el edificio central del Campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte, el edificio residencial se tomará en consideración el edificio de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas y el entorno de fábrica será el taller de mantenimiento automotriz situados en el mismo campus.

Tabla 8: Datos aproximados de los edificios de estudios para los parámetros del modelo de la UIT espectro licenciado

PARÁMETROS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
DISTANCIA (m)	15	15	15
# DE PLANTAS	5	5	0
PENETRACION SUELO 800MHZ (dB)	$9+5(n-1)$	$9+5(n-1)$	0
PENETRACION SUELO 1800MHZ (dB)	$4n$	$15+4(n-1)$	0
PENETRACION SUELO 2600MHZ (dB)	10	14	0

Figura 12: Simulación de la tecnología NarrowBand en espacio de interiores a 800 MHz



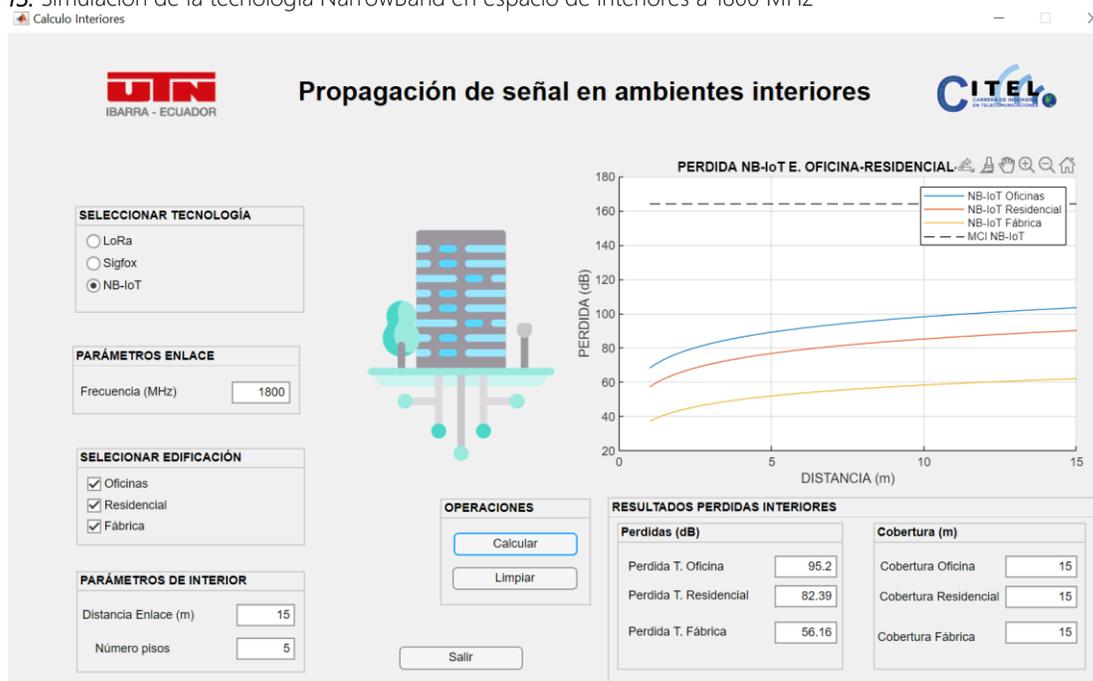
En la *figura 12* se selecciona una de las frecuencias con las que trabaja la tecnología NarrowBand la cual es de 800 MHz en los tres tipos de edificaciones y poder establecer una relación comparativa de esta tecnología con respecto algunos edificios de estudio.

Tabla 9: Comparación de edificaciones con respecto a sus resultados del enlace Narrowband (800 MHz)

RESULTADOS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
PÉRDIDA (DB)	79.38	79.38	49.12
COBERTURA (M)	15	15	15

En la simulación se establece los valores de pérdida en las edificaciones de estudio, las pérdidas establecidas en las edificaciones de oficinas y residenciales son las mismas debido a que el edificio de oficinas es mayor a 3 pisos y por lo tanto es necesario establecer la fórmula de la pérdida de penetración del suelo similar a la fórmula de pérdida de penetración del suelo de un edificio residencial y es por lo que las pérdidas en las dos edificaciones son las mismas a una frecuencia de 800 MHz y no existe variación alguna entre ambos edificios.

Figura 13: Simulación de la tecnología NarrowBand en espacio de interiores a 1800 MHz



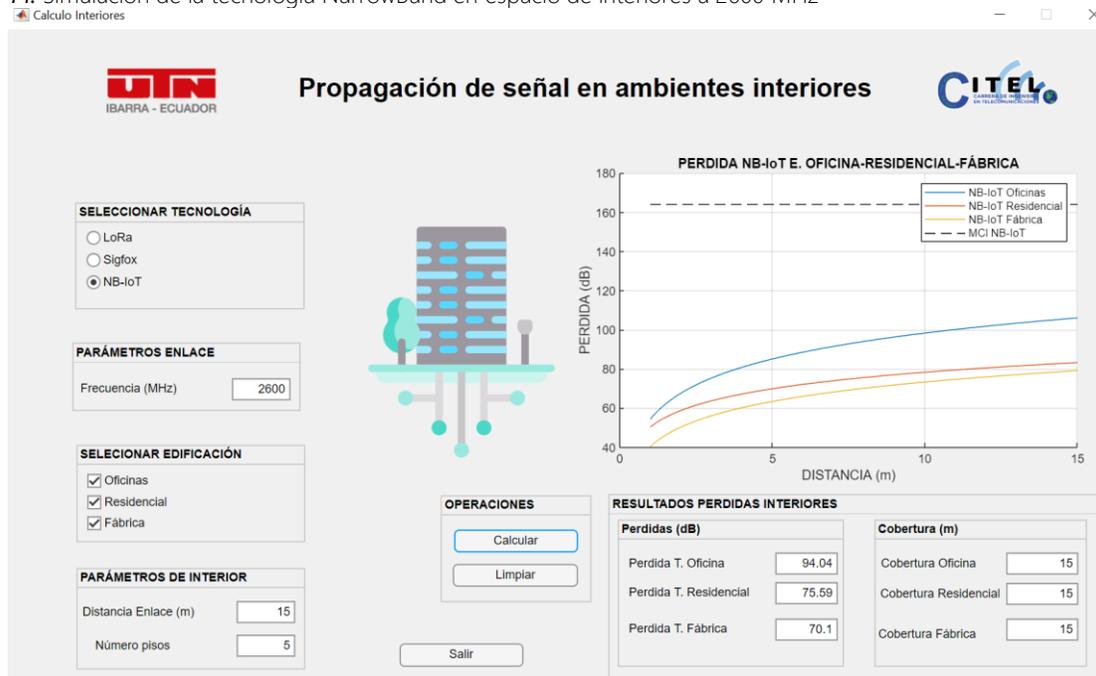
En la gráfica se selecciona una de las frecuencias con las que trabaja la tecnología NarrowBand la cual es de 1800 MHz en los tres tipos de edificaciones y poder establecer una relación comparativa de esta tecnología con respecto algunos edificios de estudio.

Tabla 10: Comparación de edificaciones con respecto a enlace Narrowband IoT(1800Mhz)

RESULTADOS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
PÉRDIDA (DB)	82.39	95.2	56.16
COBERTURA (M)	15	15	15

En la simulación se establece los valores de pérdida de potencia de la señal y la cobertura que tiene el enlace, con respecto a la frecuencia que está usando la tecnología existe un cambio en la fórmula de pérdida de penetración del suelo expuesto en la Tabla 4 el cual indica que entre las tres edificaciones dentro de una fábrica es la edificación con menos pérdidas mientras que en un edificio de oficinas existe el mayor valor de pérdidas para ese enlace.

Figura 14: Simulación de la tecnología NarrowBand en espacio de interiores a 2600 MHz



En la gráfica se selecciona una de las frecuencias con las que trabaja la tecnología NarrowBand la cual es de 2600 MHz en los tres tipos de edificaciones y poder establecer una relación comparativa de esta tecnología con respecto algunos edificios de estudio.

Tabla 11: Comparación de edificaciones con respecto a sus resultados del enlace Narrowband (1800 MHz)

RESULTADOS	EDIFICIO RESIDENCIAL	EDIFICIO OFICINAS	FÁBRICA
PÉRDIDA (DB)	75.39	94.04	70.1
COBERTURA (M)	15	15	15

En la simulación se establece los valores de pérdida de potencia de la señal y la cobertura que tiene el enlace a una frecuencia de 2600 MHz que está usando la tecnología, existe un cambio en la pérdida de penetración del suelo expuesto en la Tabla 4 el cual indica que entre las tres edificaciones dentro de una fábrica es la edificación con menos pérdidas mientras que en un edificio de oficinas existe el mayor valor de pérdidas para ese enlace.

Entre las tres frecuencias que se realizó el cálculo de pérdida de potencia de la señal se estableció que las frecuencias de 800 MHz y 2600 MHz existe menos pérdida en cuanto a las tres edificaciones mientras que en la frecuencia de 1800 MHz tiene la mayor cantidad de pérdidas de potencia por lo que se concluye que las frecuencias ideales en NarrowBand es de 800MHz y 2600 MHz.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

INSTITUTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE LA INTERFAZ REALIZADA
PARA PROPAGACIÓN DE TECNOLOGÍAS LPWAN: LORA, SIGFOX
Y NARROWBAND (NB-IoT)

Uso en Laboratorio de Electrónica / Carrera de Ingeniería en
Telecomunicaciones

NOVIEMBRE 2020

Introducción

Las tecnologías LPWAN permiten transmitir pocos datos entre un dispositivo a una estación base/Gateway a través de varios metros o kilómetros con un bajo consumo energético de los dispositivos que interactúan en la red permitiéndose tener un tiempo de vida de los dispositivos de 10 años como mínimo.

Hoy en día las tecnologías que sobresalen en este campo de LPWAN son: LoRa, Sigfox y Narrowband IoT usando bandas de frecuencia tanto libres como privadas. La Interfaz presentada en el manual permitirá al usuario realizar enlaces de estas tecnologías ingresando parámetros con respecto a distancias, altura de antenas, frecuencias, entre otros; aplicados a diferentes ambientes externos como zonas urbanas, suburbanas y rurales mientras que en ambientes interiores variará de acuerdo con el tipo de edificación, este puede ser edificio de oficinas, edificio residencial o una fábrica. El modelo matemático implementado para el desarrollo de la interfaz en cada entorno es el basado en Okumura-Hata para exteriores; mientras que para evaluar la propagación en interiores la Recomendación de la ITU, denominada ITU-R P.1238-10; esto permitirá tener una predicción de pérdidas del enlace con respecto a cada tecnología y a cada entorno con el objetivo de proporcionar datos comparativos al usuario.

El presente manual tiene como finalidad instruir al usuario de la Interfaz desarrollada en el App Designer de MATLAB a través de procedimientos y formularios guía que facilden la relación usuario-programa y permita el correcto uso según las temáticas de aplicación.

Objetivo del Manual

Disponer de una herramienta de predicción de pérdidas de enlaces y propagación de tecnologías LPWAN (LoRa, Sigfox y NarrowBand) que permita obtener y comparar datos en diferentes ambientes de aplicación para los estudiantes que usan laboratorios afines de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones

Instructivo de Uso del Software para la Predicción de Pérdidas y Propagación de Tecnologías LPWAN

El presente instructivo presenta las características, restricciones, parámetros ingresados por el usuario y modo de uso de la Interfaz desarrollada para comprender el comportamiento de las tecnologías LPWAN en diferentes entornos de implementación. Cada ítem expuesto en el manual se basa en la descripción, comportamiento, simulaciones realizadas con anterioridad. El usuario debe comprender cada ítem presentado en el manual para no presentar futuros errores en datos obtenidos en pérdidas de enlace o en el ingreso incorrecto de datos de parámetros de los enlaces; cada parámetro está fundamentado con referencias bibliográficas oficiales de cada tecnología.

Propósito del Instructivo de Uso del Software para Tecnologías LPWAN

El objetivo que persigue la Interfaz como el Instructivo propuesto es proporcionar un programa de simulación de pérdidas y propagación en diversos ambientes, que a través de un modelo matemático permite obtener variables y comparar su comportamiento en cada entorno. Como consecuente la Interfaz agiliza el cálculo manual de los valores obtenidos mediante código, que es evidenciado en el instructivo. En este sentido, los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones podrán comprender el uso correcto del mismo con parámetros adecuados a cada tecnología LPWAN.

Alcance

La Interfaz desarrollada está enfocada hacia dos ambientes que al aplicar el modelo matemático y la recomendación de la ITU están dados por:

1.1. Entorno Exterior

La primera interfaz de simulación está diseñada para ambientes exteriores que permiten calcular la pérdida y propagación en zonas urbanas, suburbanas y rurales.

1.2. Entorno Interior

El ambiente interior descrito en la segunda interfaz de simulación permite obtener la pérdida y la propagación del enlace en edificaciones de oficinas, residenciales y fábrica, considerando el número de pisos que existe entre transmisor y receptor.

Referencias

- ITU-r. (2020). Recomendación UIT-R P.1238-10 (08/2019) – Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 450 GHz (Vol. 10). <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Rubinstein, T. N. (2002). Manual Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas y decimétricas. 122. <http://www.itu.int/ITU-R>
- Sigfox. (2017). Sigfox Technical Overview. 1(May), 26. <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- LoRa Alliance Technical Committee. (2017). LoRaWAN 1.1 Specification. LoRaWAN 1.1 Specification, 1.1, 101. <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>
- Miranda, J. S. (2019). otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico .

Responsabilidad

Persona Responsable de Laboratorio: Técnico Docente Asignado.

Restricciones y roles hacia los usuarios del software:

- El código desarrollado no podrá ser modificado ni eliminado sin el consentimiento del autor del programa.
- El manual de procedimientos podrá ser solicitado por los usuarios a la persona responsable para comprender el uso del programa. Sin embargo, dicho documento no podrá ser modificado o eliminado sin el consentimiento del autor de éste.
- El software podrá ser solicitado a cualquier instante en que el usuario lo necesite siempre y cuando se encuentre una persona responsable del programa con la finalidad de evitar problemas en cuanto a su uso y proporcionar una guía introductoria del funcionamiento.
- El uso del software será exclusivamente con fines educativos enfocados hacia prácticas de laboratorio, proyectos de vinculación o prácticas profesionales y no para fines lucrativos.
- Se deberá tener un control de uso en donde deberá constar: el número de personas que van a usar el software, el nombre de la persona responsable que lo solicitó, la descripción de la actividad y la fecha de uso.
- Los datos proporcionados por el usuario para la ficha de control de uso del software serán de uso exclusivo para el control de uso y no con fines lucrativos.

Definiciones

Manual de procedimientos: Según (Vivanca Vergara Maria E, 2017) "El manual de procedimientos es un documento del sistema de control, el cual se crea para obtener una información detallada e integral que contiene las instrucciones, responsabilidades e información sobre políticas y procedimientos de las operaciones de una guía técnica"

Software: El software es aquel programa o conjunto de programas que permite realizar procesamiento de datos con la finalidad de realizar acciones dentro del sistema.

Matlab: (Requez, n.d.) MATLAB es un programa computacional que ejecuta una gran variedad de operaciones y tareas matemáticas. Es una herramienta poderosa, y puede manejar los cálculos involucrados en problemas de ingeniería y ciencia.

Propagación de onda: (Fernandez, n.d.) se define como una perturbación que se propaga de un punto a otro sin que exista transporte neto de materia, pero sí transmisión de energía.

Pérdida de potencia de onda (Atenuación): (Atenuación (Telecomunicaciones), n.d.) La atenuación es la pérdida de potencia de señal al recorrer cierta distancia, por lo que es un parámetro que debemos considerar al momento de diseñar el enlace.

Descripción de Interfaz

Se describe las características de diseño de la Interfaz, misma que consta de 3 secciones como se explica a continuación.

Interfaz y estructura del programa.

Se describe las interfaces gráficas que intervienen en el software al igual que los parámetros estándares que se debe considerar al instante de elaborar un enlace de tecnologías LPWAN. El software en general esta constituido de 3 interfaces (Interfaz Inicial, Interfaz Propagación en Exteriores, Interfaz Propagación en Interiores), cada una consta con sus parámetros y de acuerdo con el caso de estudio.

Interfaz Principal

La interfaz principal *Figura 1* consta con información general y nombre del software para identificar el autor, de igual manera presenta dos botones los cuales redirigen a las interfaces secundarias donde se desarrolla el cálculo de propagación de ondas en ambientes exteriores e interiores.

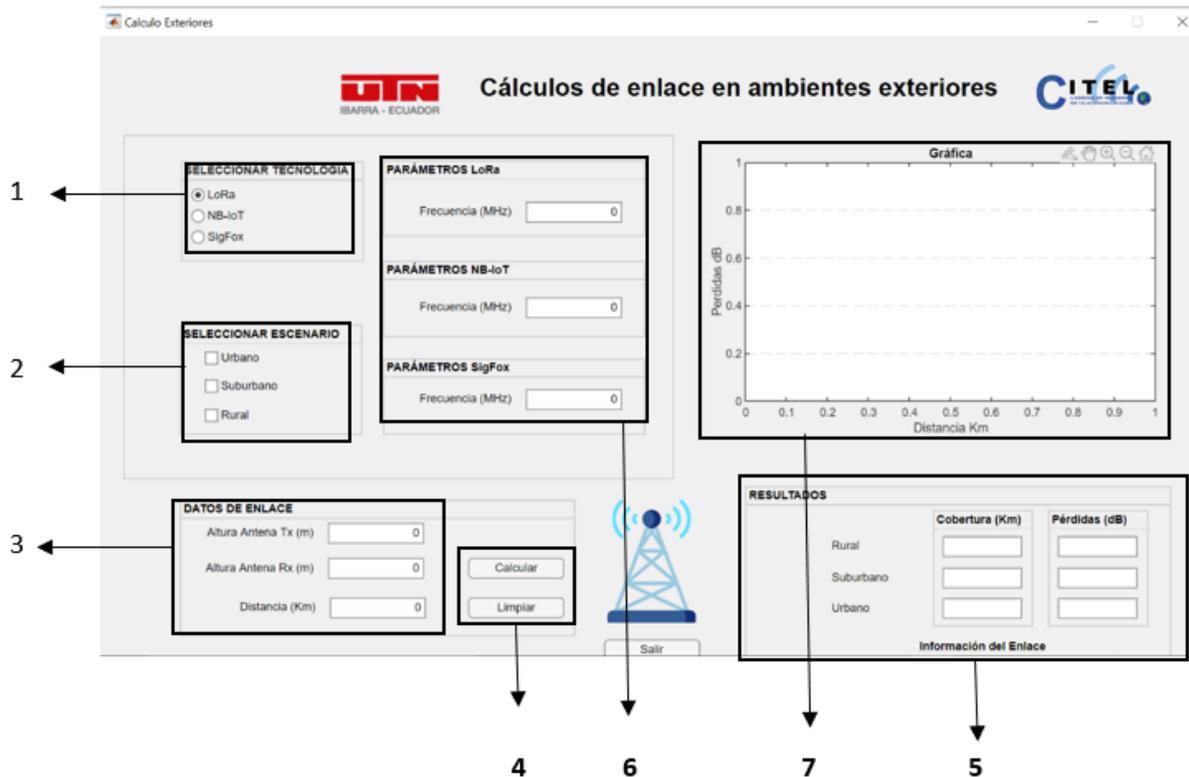
Figura 1: Interfaz Home



Interfaz de Cálculos en Ambientes Exteriores

La interfaz de cálculos de propagación de onda en exteriores en *Figura 2* permite conocer la atenuación que existe en los entornos urbanos, suburbanos y rurales y evidenciarlos en las gráficas para ese propósito, el modelo matemático implementado dentro de esta interfaz es Okumura-Hata.

Figura 2 Interfaz de cálculos en ambientes exteriores



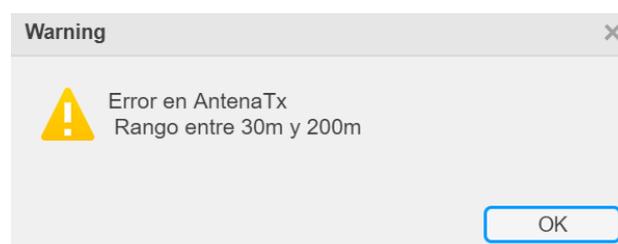
Nomenclatura de Interfaz en Exteriores

1. Seleccione el tipo de tecnología con la cual se desee realizar los cálculos de propagación.
2. Seleccione los ambientes se desea aplicar en el enlace, se enfatiza que se puede seleccionar desde 1 escenario hasta los 3 escenarios y graficarlos para una posterior comparación de datos.
3. Ingrese los parámetros de altura de antenas tanto de transmisión como de recepción y a su vez la distancia que cubre todo el enlace para el posterior cálculo.
4. Botones de calcular y limpiar todos los espacios de datos para reiniciar el cálculo con nuevos datos.
5. Zona de resultados de acuerdo con el tipo de ambiente que se seleccionó previamente en donde se expondrá la pérdida en dB y la cobertura máxima en kilómetros.
6. Seleccione la frecuencia a la que trabaja cada tecnología tomando en consideración el rango de frecuencias expuestos en la *tabla 1*.
7. Zona de gráficos en donde indicará como varia la pérdida del enlace de acuerdo con la distancia y según el entorno del enlace.

Observaciones

Todos los parámetros que se solicitan por el programa deberán de ser completados para ejecutar el cálculo; de no cumplirlo, existen restricciones que por el desarrollo del modelo matemático solicitan trabajar en el rango de estudio y no podrán ser ejecutados. En ese caso se muestra un mensaje de advertencia en la *Figura 3*.

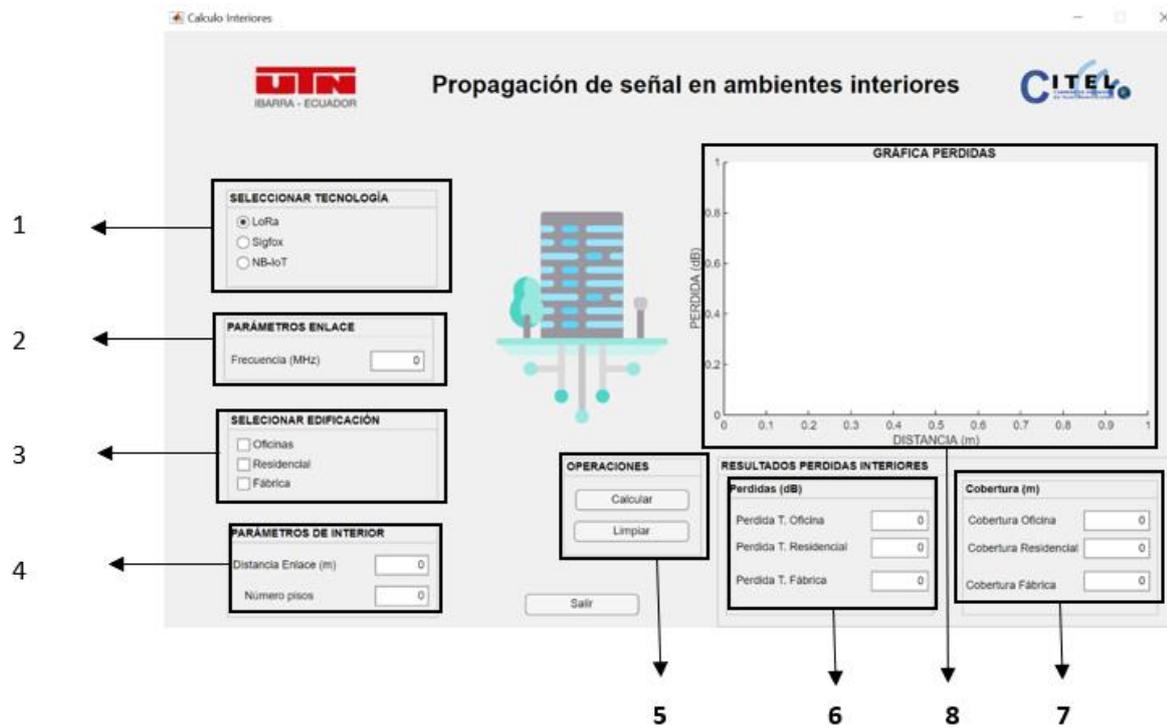
Figura 3: Mensaje de advertencia con respecto al parámetro altura de antena



Interfaz de Cálculos en Ambientes de interiores

La interfaz de cálculos de propagación en ambientes de interiores de la *Figura 4* permite al usuario conocer la pérdida y propagación de onda en ambientes interiores según la edificación de aplicación, esta puede ser: edificio de Oficinas, edificio Residencial y Fábrica. El modelo matemático aplicado hacia esta interfaz trabaja equitativamente con la Recomendación ITU-R P.1238-10.

Figura 4: Interfaz de cálculos en ambientes de interiores



Nomenclatura de Interfaz en interiores

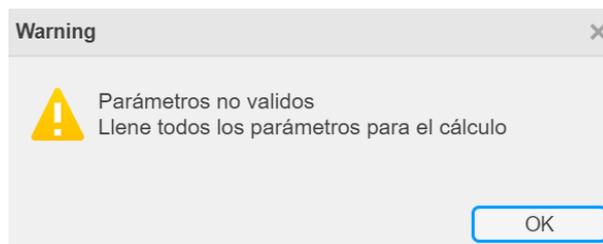
1. Seleccione el tipo de tecnología con la cual se desee realizar los cálculos de pérdida de enlace.
2. Seleccione la frecuencia con la que la tecnología escogida trabaje, las frecuencias asignadas según el modelo matemático implementado se encuentran en la *tabla 2*.
3. Seleccionar el tipo de edificaciones en las que se desea realizar el enlace, en el caso de escoger las tres edificaciones se podrá determinar una gráfica comparativa de la misma tecnología en diferentes edificaciones.

4. Escriba el número de pisos y la distancia que existe entre el transmisor y el receptor.
5. Botones que permita realizar tanto el cálculo del enlace como borrar los datos ingresados anteriormente.
6. Parámetros de resultados de la pérdida del enlace expresado en dB.
7. Parámetros de resultados de la cobertura de las tecnologías expresada en metros.
8. Zona de gráficos en donde indicará como varia la pérdida de acuerdo con la distancia según el entorno del enlace.

Observaciones

Los parámetros que sean necesarios para calcular la pérdida del enlace deben encontrarse con un valor ingresado por el usuario debido a que el software restringe la acción de calcular en el caso en que uno de los parámetros se encuentre en blanco y enviará un mensaje de advertencia *Figura 5* explicándose que no se puede realizar el cálculo debido a que falta datos para el cálculo correspondiente.

Figura 5 Mensaje de advertencia con respecto a parámetros no validos o en blanco



Rangos de operación

La *tabla 1* muestra los parámetros de diseño en los que es posible desarrollar simulación con el programa propuesto.

Tabla 1: Parámetros estándares para la interfaz de cálculos en ambientes exteriores

Parámetro	Rango de valores admitidos
Frecuencia	150-1500 MHz
Altura Antena Tx	30-200 metros
Altura Antena Rx	1-10 metros
Distancia	1-20 Kilómetros

La *tabla 2* muestra los parámetros de operación para la interfaz en ambientes interiores.

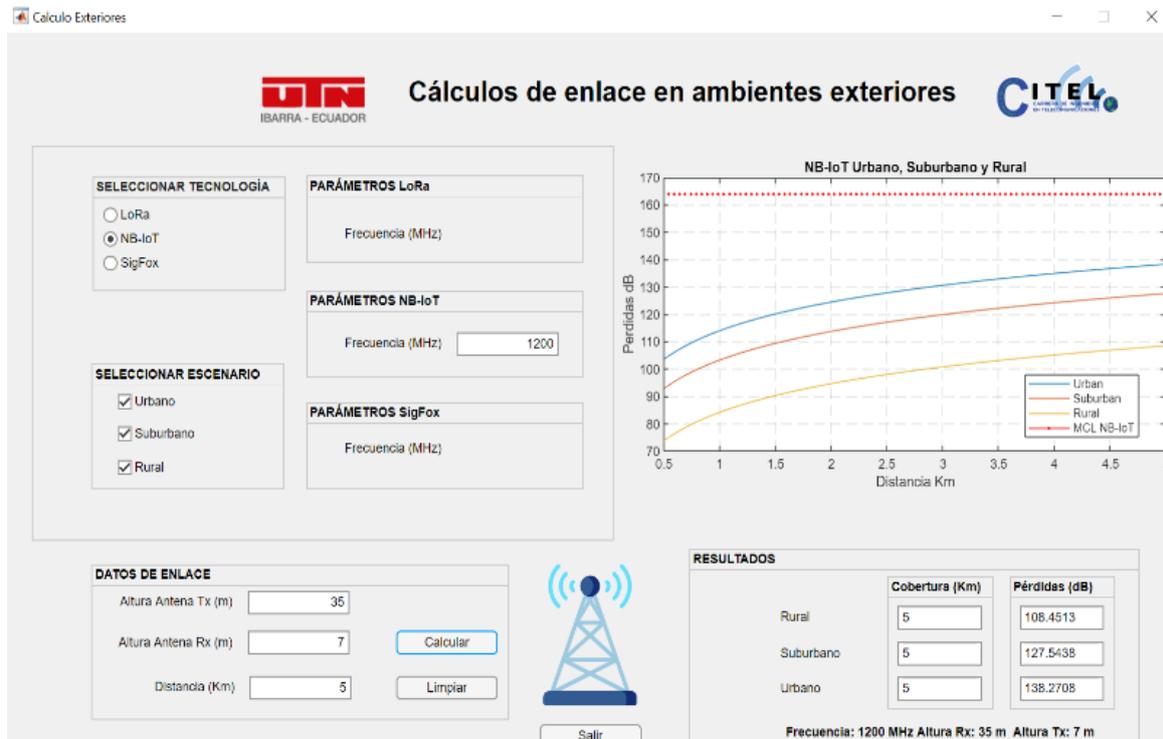
Tabla 2: Parámetros estándares para la interfaz de cálculos en ambientes exteriores

Parámetro	Rango de valores admitidos
Frecuencia LoRa	902-920 MHz
Frecuencia Sigfox	868-920 MHz
Frecuencia NB-IoT	800-1800-2600 MHz

Pruebas de funcionamiento

En la *figura 6* se muestra el funcionamiento de la interfaz de cálculos en ambientes exteriores.

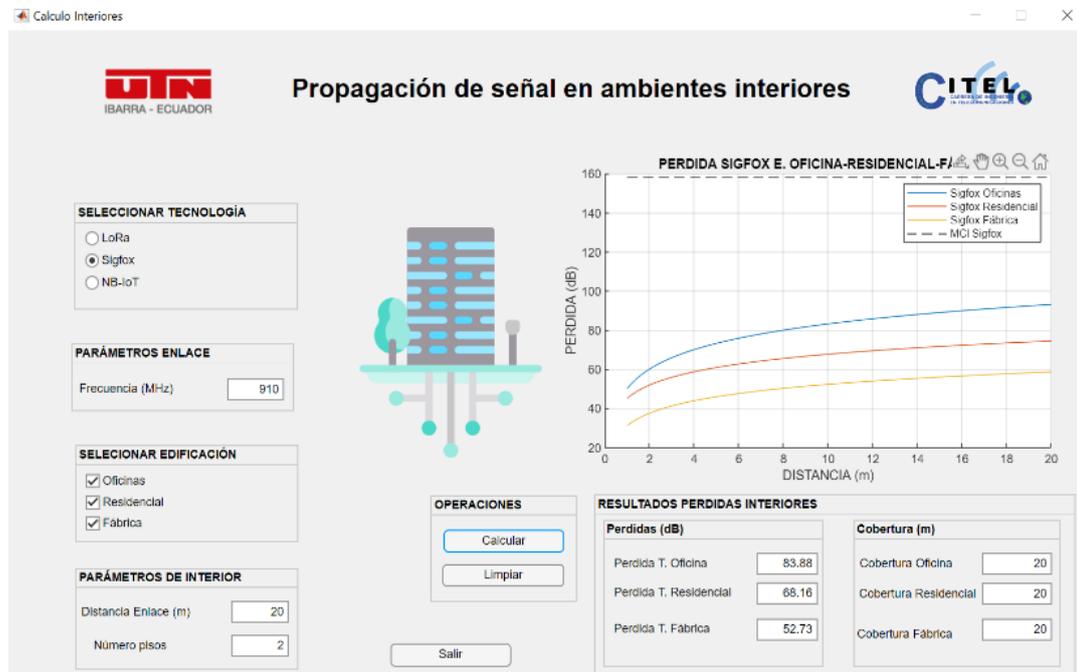
Figura 6: Funcionamiento de Interfaz para exteriores



Nota: La Interfaz de la figura muestra en escenario NB-IoT, con frecuencia de 1200 MHz, en los tres entornos propuestos: Urbano, Suburbano y Rural; donde las alturas de antenas de transmisión y recepción son 35 metros y 7 metros, respectivamente y la distancia en kilómetros está dada por 5Km. Conforme al resultado se concluye que para los tres ambientes la tecnología cubre totalmente su radio y existen pérdidas de propagación en mayor valor para un ambiente urbano.

En la *figura 7* se muestra el funcionamiento de la interfaz de cálculos en ambientes interiores.

Figura 7: Funcionamiento de interfaz para interiores.



Nota: La figura muestra una simulación en ambientes interiores, con la tecnología Sigfox, para escenarios residenciales, de oficina y fábricas, considerando una distancia de enlace de 20 metros y un rango de pisos de 2, donde el resultado obtenido demuestra que existe cobertura en los tres, sin embargo un enlace más eficiente es en fábricas, porque el valor de pérdida de propagación es menor que los demás.

Formatos para registro de uso de interfaz.

Se propone formatos que facilitarán el uso del recurso propuesto, con fines académicos en laboratorios de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

- a) **Anexo 1** – Hoja de registro de uso de software.
- b) **Anexo 2** – Diagrama de Flujo para el uso del software.

Anexo 1 – Hoja de registro de uso del software para tecnologías LPWAN

 	REGISTRO DE USUARIOS QUE HACEN USO DEL SOFTWARE LPWAN	PR-CITEL- ELECTRÓNICA
	SOFTWARE PARA TECNOLOGÍAS LPWAN: LORA, SIGFOX Y NARROWBAND	Fecha:
		Versión:
		Página: 1 de 2
Unidad: Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones		Área responsable: Laboratorio de Electrónica

Descripción de Actividades

N°	Responsable	Actividad	Tiempo de uso (minutos)
		Ingeniería en Electrónica y Redes de Comunicación Telecomunicaciones	Tiempo de uso total: (minutos)

Anexo 2 – Diagramas de flujo entornos exteriores e interiores.

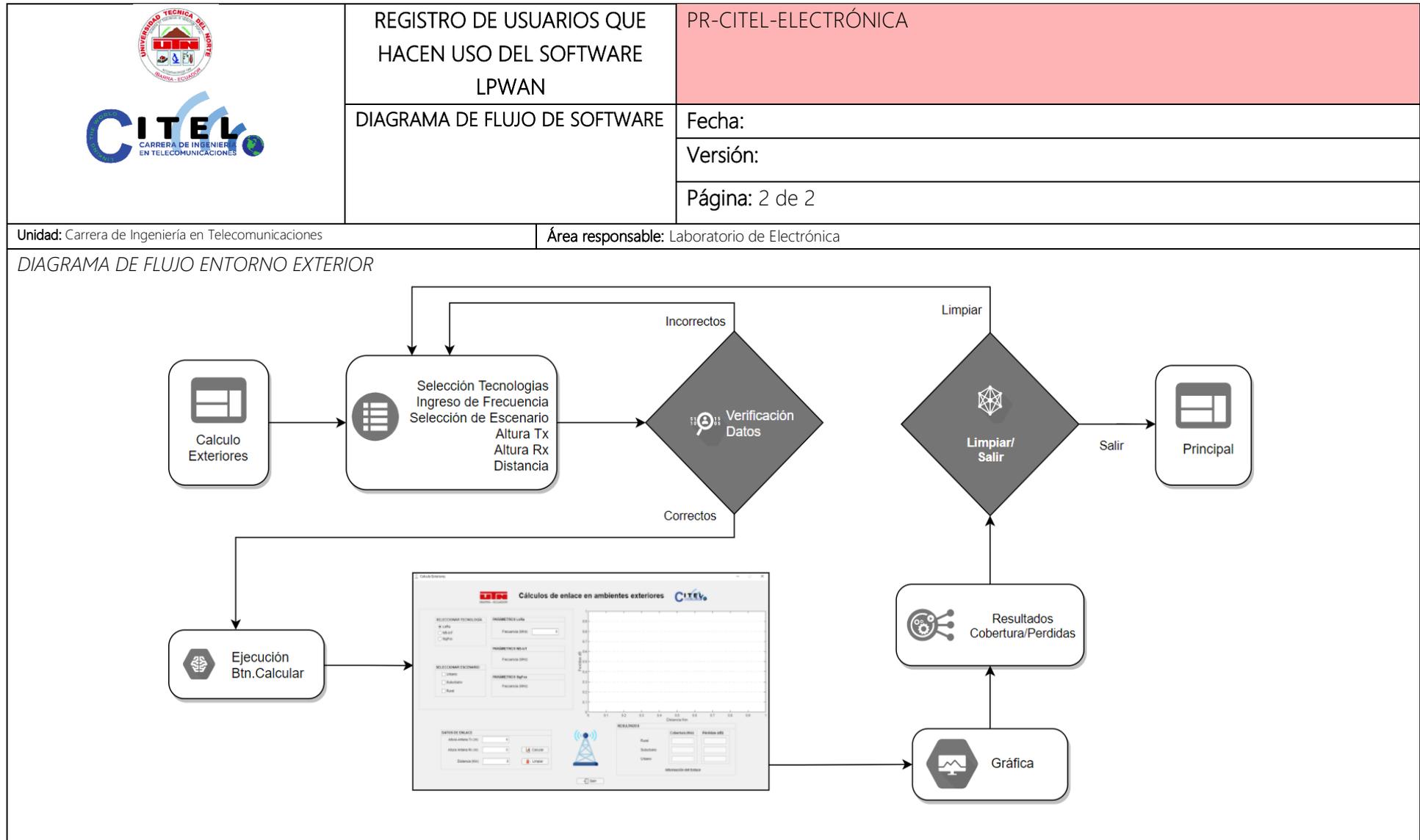
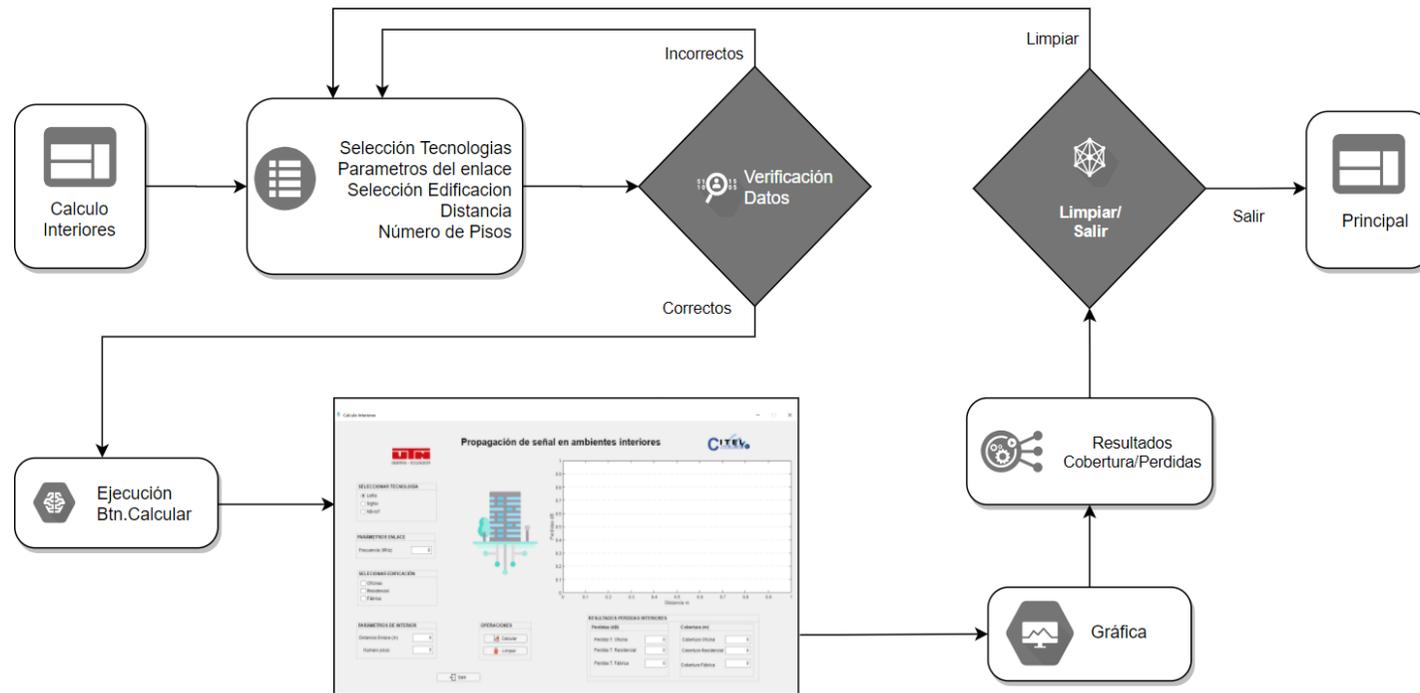
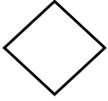


DIAGRAMA DE FLUJO EN ENTORNO INTERIOR



Simbología ANSI para el diagrama de flujo

Simbología	Nombre	Descripción
	Actividad	Representa la ejecución de una o mas tareas de un procedimiento
	Decisión	Indica las opciones que se puedan seguir en caso de que sea necesario tomar caminos alternativos.
	Flujo	Conecta símbolos, señalando la secuencia en que deben realizarse las tareas.

Nombre de Documento	Elaborado por	Revisado y Aprobado por	Fecha
Manual de procedimientos para uso académico Carrera Ingeniería en Telecomunicaciones	Ing. Alejandra Pinto Erazo	Msc. Luis Suárez Zambrano	20 /11/2020