

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES IOT**

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES  
UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA NB-IOT (NARROW BAND –  
INTERNET OF THINGS)**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN  
TELECOMUNICACIONES**

**CATALINA ELIZABETH LÓPEZ PUJOTA**

**[catalina.lopez@epn.edu.ec](mailto:catalina.lopez@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA**

**[soraya.sinche@epn.edu.ec](mailto:soraya.sinche@epn.edu.ec)**

**DMQ, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, CATALINA ELIZABETH LÓPEZ PUJOTA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**CATALINA ELIZABETH LÓPEZ PUJOTA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CATALINA ELIZABETH LÓPEZ PUJOTA, bajo mi supervisión.

---

**SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CATALINA ELIZABETH LÓPEZ PUJOTA

SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi padre Juan López y un sentimiento de gratitud infinita en especial a mi madre Rocío Pujota que a pesar de ya no estar presente dejando un vacío en mi corazón siempre tuvo palabras de aliento, amor y empuje para no rendirme, me ha acompañado en este proceso, donde ratifico la suerte que he tenido en tenerles como padres. Sin dudar es un logro que se convierte como parte de ellos.

A Jhonny Álvarez mi hermano quien ha sido mi apoyo incondicional en todas las dificultades que se ha presentado en mi vida.

A mi familia Marquito, Verito, Daysi, a mis sobrinos Dilansito, Cassielito, Brihannita, Hedisita y Amisita, a mis cunados Eucho y Dianita, a amigos tanto de la universidad como de la vida quienes han compartido conmigo todos los sacrificios y alegrías e hicieron que esta trayectoria sea más amena y a todos los que hicieron posible que este logro se cumpla: amor y gratitud infinita.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, ya que con su bendición todo esto es posible.

Agradezco a mi madre Rocío Pujota por haberme brindado su apoyo y ser mi guía para concluir con este proyecto. A mi padre Juan López por el esfuerzo y los valores que nos enseña a cada uno de sus hijos/as.

A mi hermano Jhonny Álvarez, por estar pendiente en cada etapa de mi vida, una persona de la cual aprendí mucho y sigue enseñándome, y por el sacrificio y el esfuerzo por ver a todos triunfar. Le agradezco a mis hermanos Marco, Verónica y Daysi, quienes son un soporte incondicional.

A la Dra. Soraya Sinche quien con sus conocimientos supo motivarme y guiarme para que todo esto se lleve a cabo. Ha sido una gran profesora y espero que Dios le bendiga y le traiga muchas bendiciones en su vida, y que los éxitos sigan marcando su camino.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Narrow-Band IoT (NB-IoT).....	4
1.4.2 Arquitectura de la red NB-IoT.....	5
1.4.3 Stack de Protocolo de NB-IoT .....	6
1.4.4 Capa Física .....	8
1.4.5 Métricas para QoS (Quality of Service). .....	12
2 METODOLOGÍA .....	14
2.1 Principios para la elaboración del Trabajo de Integración Curricular .....	14
2.1.1 Descripción del Método Documental .....	14
2.1.2 Descripción del Método Experimental .....	17
2.2 Procedimiento de las actividades para el desarrollo del Proyecto de Titulación.....	18
2.2.1 Descripción de los Escenarios para análisis de NB-IoT. ....	18
2.2.2 Latencia y consumo de energía en enlaces uplink y downlink en redes NB-IoT.[22] .....	21
2.2.3 Modelo de cola del protocolo de acceso en NB-IoT.[22] .....	23
2.2.4 Modelo de Propagación.....	28
2.3 Desarrollo de los escenarios en Matlab .....	33
2.3.1 Parámetros utilizados para cada interfaz en Matlab .....	33
2.3.2 Simulación de escenarios NB-IoT con MATLAB .....	35
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41

3.1	Resultados .....	41
3.1.1	Escenario 1: Ambiente Externo con número de Nodos=10. ....	41
3.1.2	Escenario 2: Ambiente Externo con número de Nodos=80. ....	46
3.1.3	Escenario 3: Ambiente externo con número de Nodos=300.....	50
3.2	Conclusiones.....	54
3.3	Recomendaciones.....	55
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
5	ANEXOS.....	58
	ANEXO I.....	59

## RESUMEN

*Narrow Band-Internet of Things* (NB-IoT) fue implementada por 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en los Release 13, 14 y 15, como una solución de conectividad de IoT (*Internet Of Things*) pues, a más de ofrecer mejoras de cobertura, NB-IoT demostró ser compatible entre operadores de redes virtuales móviles o no móviles, ubicaciones y proveedores. Además, proporciona garantías de calidad de servicio (QoS) de extremo a extremo y utiliza el espectro con licencia para mejorar la confiabilidad y el rendimiento.

El presente trabajo propone un estudio de la tecnología NB-IoT, donde también presenta un estudio del consumo de energía de los dispositivos NB-IoT durante la transmisión de datos en tres escenarios, permitiendo analizar su comportamiento haciendo uso de diferentes escenarios.

El presente trabajo se estructura en 3 capítulos. En el capítulo 1, se introducen aspectos fundamentales de la tecnología NB-IoT, así como su arquitectura, bandas de frecuencias, protocolos de acceso, capas físicas y métricas de calidad de servicio. En el capítulo 2 se describe la metodología para elaboración del proyecto, se proponen 3 escenarios a simular utilizando Matlab, así como los parámetros requeridos para estas simulaciones. Finalmente, en el capítulo 3 se presentan los resultados de las simulaciones basados en las pérdidas de trayecto, la duración de la batería frente a los canales físicos, las clases de cobertura, la velocidad de datos en los enlaces (ascendente y descendente), y los paquetes enviados por día. Además, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

**PALABRAS CLAVE:** Internet de las cosas, NB-IoT, 3GPP, latencia, duración de la batería.



## **ABSTRACT**

Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) was implemented by 3GPP in Release 13,14 y 15, as an IoT (Internet of Things) connectivity solution. Because, in addition to offering coverage improvements, NB-IoT has shown to be compatible across mobile or non-mobile virtual network carriers, locations, and providers. Additionally, it provides end-to-end Quality of Service (QoS) assurances and uses licensed spectrum to improve reliability and performance.

The present work proposes a study of NB-IoT technology, where it also presents a study of the energy consumption of NB-IoT devices during data transmission in three scenarios, allowing to analyze their behavior using these different scenarios.

This work is structured in 3 chapters. Chapter 1 introduces fundamental aspects of NB-IoT technology, as well as its architecture, frequency bands, access protocols, physical layers, and quality of service metrics. Chapter 2 describes the methodology for the development of the project, proposes 3 scenarios to simulate using MATLAB, as well as the parameters required for these simulations. Finally, Chapter 3 presents the results of simulations based on path losses, battery lifetime versus physical channels, coverage classes, data rate on links (uplink and downlink), and packets sent per day. In addition, the conclusions and recommendations of the work carried out are presented.

**KEYWORDS:** Internet of Things, NB-IoT, 3GPP, latency, lifetime devices.

# 1 INTRODUCCIÓN

A medida que los sistemas IoT (*Internet of Things*) están en auge, surgen nuevas tecnologías de comunicación inalámbricas que permiten la conexión de gran cantidad de dispositivos, transmiten tamaño de paquetes cortos a largo alcance, con bajo costo y bajo consumo de energía, denominadas LPWAN (*Low-Power Wide Area Network*) [1].

Actualmente, una de estas tecnologías es NB-IoT (*Narrow Band Internet of Things*) [2], que tiene la posibilidad de conectarse con billones de dispositivos integrados simultáneamente a través de redes celulares. Esto permite tener una amplia variedad de aplicaciones innovadoras en los mercados emergentes que requieran distintos requisitos y consideraciones. Sin embargo, en otros escenarios pueden tener limitaciones de cobertura o latencia, dependiendo del entorno de la aplicación. Esta tecnología se ha comenzado a desplegar en diferentes países de América Latina tales como Chile, Colombia, Argentina, y Brasil [3]. Sin embargo, en Ecuador aún no se ha realizado la implementación.

NB-IoT al ser una tecnología móvil sobre espectro licenciado basado en el sistema EPS (*Evolved Packet System*) se enfoca en el desarrollo de comunicaciones eficientes, alta cobertura, bajo consumo de energía que permite una duración prolongada de la batería, proporcionar dispositivos de bajo costo, conexión segura, un bajo costo y autenticación sólida. Se espera que los dispositivos NB-IoT tengan una duración de batería de varios años (aprox. 10 años) para evitar la necesidad de reemplazar la batería. Existen diferentes aplicaciones que pueden ser compatibles con las redes NB-IoT, como la medición inteligente, la gestión inteligente de residuos, el monitoreo de la calidad del aire y el alumbrado público inteligente, etc. [2], [4].

El presente trabajo propone un estudio de la tecnología NB-IoT establecida por 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) bajo el Release 13 y posteriores. También presenta un estudio del consumo de energía de los dispositivos NB-IoT durante la transmisión de datos en diferentes escenarios, con base a las clases de cobertura y sistemas de colas que genera expresiones matemáticas, permitiendo así el análisis del consumo de energía, latencia del servicio y duración de la batería.

Para analizar la tecnología, se implementarán 3 escenarios de prueba utilizando Matlab, en donde se configurarán parámetros que permitan realizar el análisis de la tecnología, luego se procederá a simular dichos escenarios con el fin de analizar el comportamiento de la red NB-IoT.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar la tecnología NB-IoT en base a diferentes escenarios de simulación utilizando Matlab.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Describir los fundamentos teóricos de la tecnología NB-IoT, así como las características, estándares, protocolos de la red proporcionadas por 3GPP.
2. Definir los parámetros a usar en la tecnología NB-IoT para las simulaciones en Matlab.
3. Implementar 3 escenarios de simulación utilizando Matlab.
4. Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones implementadas.

## **1.3 ALCANCE**

El presente proyecto inicia con una fase teórica, donde se detallan las características técnicas que soportan la tecnología NB-IoT como solución de acceso inalámbrico móvil eficaz para respaldar la conectividad con dispositivos IoT, su situación dentro del espectro licenciado de radiofrecuencias, las técnicas de acceso al medio.

A continuación, se planea una fase de análisis, que se centrará en la arquitectura de la red NB-IoT utilizando la infraestructura LTE existente, estandarizada por 3GPP en el Release 13 y nuevas versiones; También se realizará el estudio de su topología, consumo de energía, así como en indicar los beneficios que brinda la tecnología en términos de calidad y servicio, latencia, confiabilidad y alcance. Además, se analizará las capas sobre las que opera la tecnología, por un lado, en la capa física se consideraran las bandas de frecuencia de operación, canales y ancho de bandas.

Luego de conocer los aspectos teóricos, se realizará la fase de implementación, en la cual se simularán en Matlab distintos escenarios. Cada escenario con distintas cantidades de nodos distribuidos aleatoriamente. La interfaz permite que el usuario varíe los parámetros de paquetes de datos, velocidad de datos en enlace descendente y ascendente, permitiendo así el análisis de resultados de cobertura, latencia del servicio, duración de la batería y pérdidas de trayectoria en base al modelo de propagación.

Finalmente, se presentará la fase de resultados, donde se compararán ventajas y desventajas de la simulación en los escenarios propuestos para evaluar la tecnología NB-IoT como una solución alternativa de comunicación en diferentes aplicaciones IoT.

## 1.4 MARCO TEÓRICO

El Internet de las cosas (IoT) en los últimos años ha representado una transformación tecnológica, permitiendo así la interconexión de las personas y los objetos en cualquier lugar, a través de las redes inalámbricas [5]. Se espera que esta revolución tecnológica genere un gran crecimiento económico en distintas áreas, ofreciendo un valor potencial en términos de eficiencia, sostenibilidad y seguridad para los proveedores de servicios de telecomunicaciones, industria y la sociedad [6].

IoT se introdujo por primera vez como un sistema de valor agregado para redes de comunicaciones móviles. Sin embargo, ahora existen dispositivos de diferentes tipos celulares y no celulares, incluidas redes de sensores, control y redes independientes [7].

Actualmente, diferentes dispositivos tienen acceso a Internet y, para el año 2025, se espera que la cantidad de dispositivos IoT conectados a la red mediante la tecnología de acceso móvil 3GPP alcance los 5 mil millones [6], (Figura 1.1). Sin embargo, al conectar diferentes dispositivos a la red, la seguridad digital se convierte en una preocupación importante, ya que el sistema podría ser hackeado.

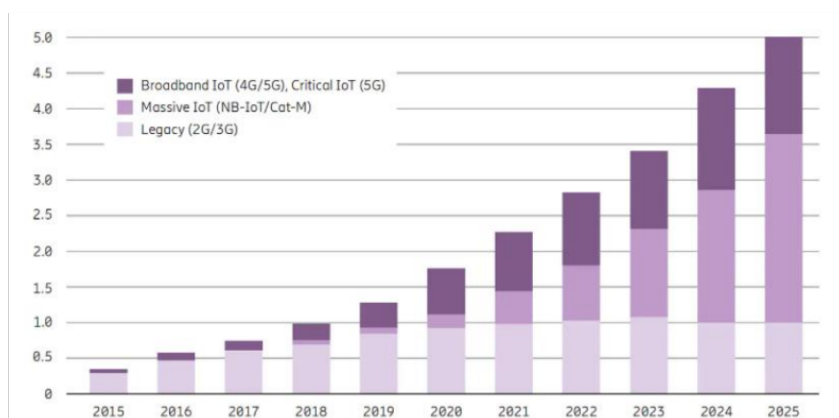


Figura 1.1. Proyección del Crecimiento de dispositivos IoT conectados con tecnologías de acceso celular [6].

A medida que el COVID-19 está transformando la forma en que las personas viven, el acceso a la red es un enfoque importante en diferentes aplicaciones, acelerando su implementación. Dada la crisis actual provocada por la pandemia, las empresas ven esto como una oportunidad para implementar sistemas comerciales de IoT en diferentes áreas.

Como se muestra en la Figura 1.2 existen muchas aplicaciones compatibles con LPWA (*Low Power Area Network*) tales como, la medición inteligente, estacionamiento inteligente, el alumbrado público inteligente, monitoreo de la calidad de aire, gestión inteligente de residuos, telemedicina, ciudades inteligentes, agricultura, etc. [8].

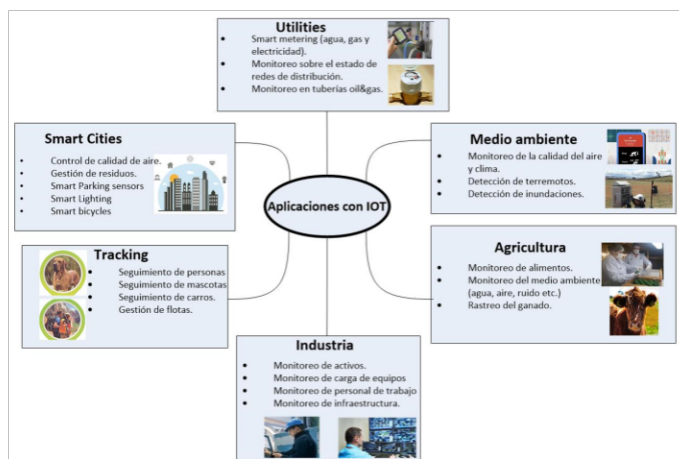


Figura 1.2. Aplicaciones de la industria y la sociedad habilitadas por LPWA [6].

Debido al desarrollo de las plataformas de IoT comerciales, surgen nuevas tecnologías capaces de transmitir a velocidades más bajas y a largo alcance, como son las redes NB-IoT, estandarizada por la 3GPP, que aborda los requisitos de LPWA (*Low-Power Wide Area Network*); además de coexistir con las redes actuales LTE (*Long Term Evolution*).

#### 1.4.1 NARROW-BAND IOT (NB-IOT).

La 3GPP, en los Release 13, 14 y 15 presentó una nueva tecnología de acceso móvil de banda estrecha llamada NB-IoT (*Narrow Band Internet of Things*). NB-IoT está diseñada para la comunicación de dispositivos de bajo costo para satisfacer las necesidades del cliente y el mercado emergente[9].

NB-IoT brinda una amplia cobertura, excelente conectividad, compatibilidad con dispositivos de baja velocidad de datos, baja latencia, dispositivos de bajo costo, bajo consumo de energía permitiendo una duración prolongada de la batería (aprox. 10 años), optimización de la arquitectura de red, mayor capacidad del sistema y eficiencia espectral, especialmente en áreas que no puedan ser cubiertas con tecnologías celulares convencionales; esto hace que NB-IoT sea competitiva en el mercado de IoT[9], [10].

Actualmente, los operadores de redes móviles están implementando NB-IoT como una solución de cobertura global que permite tanto para clientes como proveedores de servicios de aplicaciones, implementar y operar sus servicios alrededor del mundo [11].

NB-IoT puede convivir con redes celulares 2G, 3G y 4G, y es compatible con todos los principales proveedores de dispositivos móviles. Actualmente, existen varios operadores que están desplegando NB-IoT en diferentes regiones del mundo como [12]: Deutsche Telekom, Telefónica, China Mobile, China Telecom, China Unicom, Telia, Etisalat, KT, NOS, TDC, Vodafone y Conacel.

Las principales características que presenta la tecnología NB-IoT son:

- Consumo de energía de 5 Wh para dispositivos NB-IoT, con un MCL (*Maximum Coupling Loss*) de 164 dB, lo que significa que una sola batería puede suministrar energía a los dispositivos NB-IoT durante años. En los recientes estándares NB-IoT, se han especificado dos niveles de potencia: 20 dBm y 23 dBm [1], [7].
- NB-IoT opera en el espectro con frecuencias menores a 1GHz (como 700MHz, 800MHz o 900MHz) para lograr un mejor acceso a la red [1].
- Para mejorar el consumo de energía, 3GPP en los Releases 12 y 13 ha implementado eDRX (*Extended Discontinuous Reception*) y PSM (*Power Saving Mode*) [13]. En el presente trabajo se presentan expresiones matemáticas de un sistema de colas basadas de un proceso de llegada de Poisson para transmisión de datos, que permiten el análisis el consumo de energía.
- En los Releases 13 y 14, el ancho de banda para NB-IoT es de 180 kHz. Se basa en OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), con una separación de subportadoras de 15 kHz en el enlace descendente. Para el enlace ascendente, el ancho de banda es 180 kHz con espacios de subportadora 3,75 kHz y 15 kHz con un sistema de transmisión de SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). Esto significa que la misma infraestructura para LTE se puede reutilizar y el espectro se puede compartir sin problemas de coexistencia [14].
- NB-IoT puede conectarse al core network de LTE, y es compatible con los servicios de red como seguridad, autenticación, políticas, monitoreo y facturación [14].

#### **1.4.2 ARQUITECTURA DE LA RED NB-IOT.**

El núcleo de la red NB-IoT está basado en EPS (*Evolved Packet System*) y define dos optimizaciones para CloT (*Cellular Internet of Things*) que son: CloT EPS en el plano de control y CloT EPS para el plano de usuario. La misma arquitectura que las redes LTE (*Long Term Evolution*) es utilizada para NB-IoT, con algunas optimizaciones para tolerar las demandas masivas de IoT. [2].

La Figura 1.3. representa la optimización en el plano de control con la línea de color rojo, mientras la optimización del plano de usuario se representa con la línea en azul.

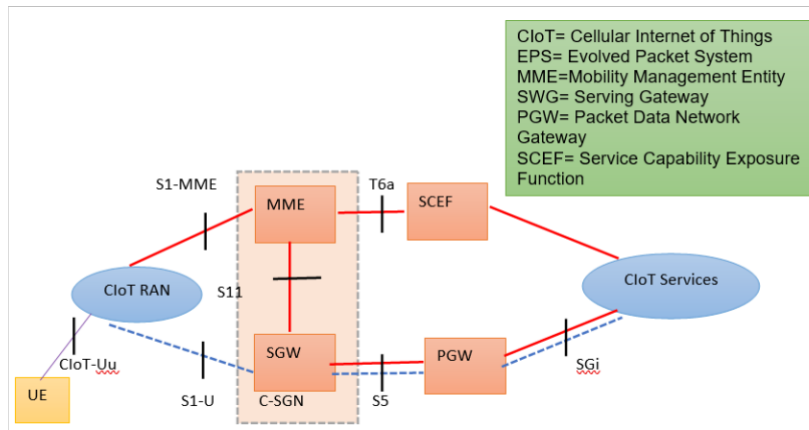


Figura 1.3. Arquitectura de red NB-IoT [2]

#### 1.4.2.1 Plano de Control para Clot EPS

La red de acceso de radio E-UTRAN (*Terrestrial Radio Access Network*) gestiona la comunicación entre el UE (*User Equipment*) y el MME (*Mobility Management Entity*), e incluye las estaciones base llamadas eNodeB (*evolved node B*) o eNB.

Los datos del enlace ascendente (UL) se transfieren al PGW (*Packet Data Network Gateway*) o al SCEF (*Service Capability Exposure Function*) a través del SGW (*Serving Gateway*). Para el enlace descendente (DL), los datos se mueven por la misma ruta, pero en la dirección opuesta.

Los datos que no son IP son transportados por SCEF a través del plano de control y proporciona interfaces abstractas para servicios de red (acceso a funciones de red y descubrimiento, aprobación y certificación) [15].

#### 1.4.2.2 Plano de Usuario para Clot EPS

En la optimización Clot EPS del plano de usuario, tanto los datos IP como no-IP se transfieren al servidor de aplicaciones mediante los PGW y S-GW. Esto provoca cierta sobrecarga al establecer una conexión, pero facilita el envío de varios paquetes.

#### 1.4.3 STACK DE PROTOCOLO DE NB-IOT

El stack de protocolo NB-IoT se muestra en la Figura 1.4 que incluye las capas, tanto para el plano de control (señalización) como para el plano de usuario (transferencia de datos). Basados en el Release 13 y el modelo OSI, la red NB-IoT puede crear las capas del stack de protocolos[14].

Las funciones de cada capa se indica a continuación [7], [14]:

- **Capa NAS (*Non-Access Stratum*):** se utiliza para intercambiar señalización no radioeléctrica entre el UE y el MME. Además, realiza control de seguridad, autenticación, gestión de movilidad y de medios.

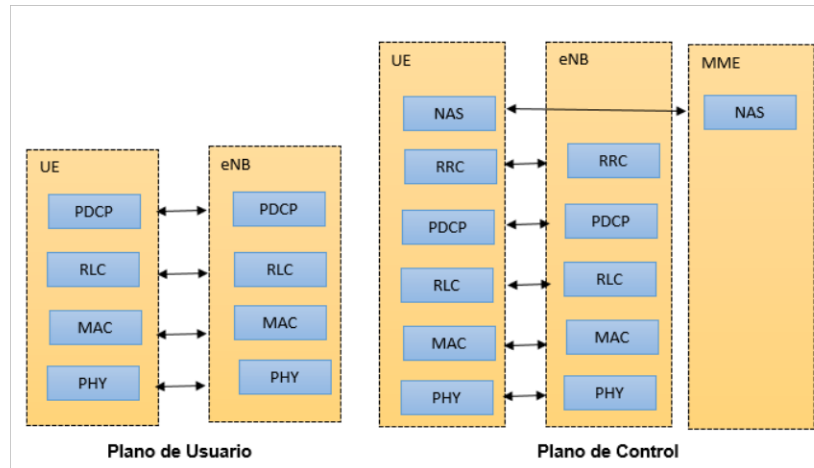


Figura 1.4. Stack de protocolos NB- IoT[14]

- **Capa RRC (*Radio Resource Control*):** reduce la señalización al suspender o reanudar las operaciones del plano de usuario. Además, gestiona servicio inicial por parte del UE a la red. NB-IoT utiliza el UDP (*User Datagram Protocol*) y otros mecanismos celulares, que permiten la transmisión de datos sin establecer una conexión previa.
- **Capa PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*):** es utilizado para la comprimir, descomprimir encabezado de datos IP, transmisión de datos (usuario o plano de control), cifrado, la protección de la integridad y verificación de los datos del plano de control.
- **Capa RLC (*Radio Link Control*):** se utiliza para transmitir los UDP (*User Datagram Protocol*) de la capa superior, corrección de errores mediante ARQ (*Automatic Repeat Query*), concatenación, segmentación y reensamblaje de datos RLC.
- **Capa MAC (*Medium Access Control*):** cumple las siguientes características [16]
  - Utilizada para mapear canales lógicos y canales de transporte.
  - Planificación (*scheduling*), asigna los recursos de manera aleatoria a los usuarios para que realicen sus envíos de manera ordenada.
  - Realiza corrección de errores en la transmisión a través de HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*).
  - Incorpora protocolos para técnicas de acceso medio y acceso múltiple



- **Capa física:** Es la interfaz aire, interactúa con el medio físico que transmite la señal. La capa física incluye los canales físicos para la comunicación de datos de control y datos de usuario.

#### 1.4.4 CAPA FÍSICA

NB-IoT emplea acceso de servicios de red utilizando la capa física con señales y canales para cumplir con los requisitos de una amplia cobertura en entornos rurales e interiores.

##### 1.4.4.1 Modos de Funcionamiento

NB-IoT se puede implementar en 3 modos, de acuerdo con 3GPP: Stand alone, Guard Band y In-Band [9]. Para reducir costo, el despliegue de NB-IoT puede ser utilizando en el espectro en GSM (*Global System for Mobile Communications*) o LTE (*Long Term Evolution*) existente, lo que ofrece más opciones de implementación en el espectro con licencia.

La Figura 1.5 indican los modos de operación en NB-IoT.

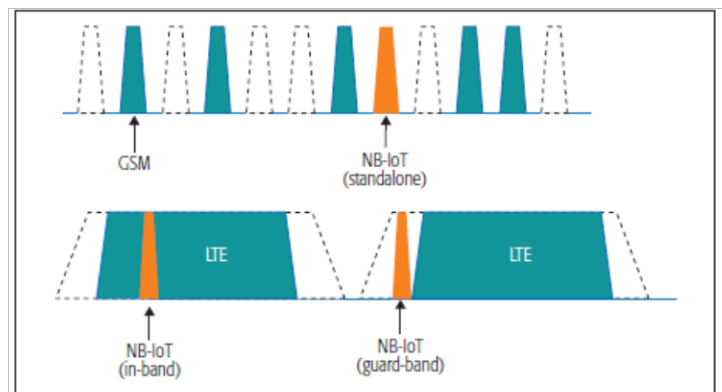


Figura 1.5. Modos de Operación de NB-IoT [9]

NB-IoT puede implementar los siguientes modos de funcionamiento:

- **Operaciones Stand alone.** En este modo, se utilizan las bandas de frecuencia GSM y UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), lo que facilita el despliegue de la portadora de NB-IoT. En ambos lados del espectro queda un intervalo de guarda de 10 kHz y la reutilización del espectro GSM con 200kHz acorta el tiempo de comercialización y acelera el proceso de recuperación [17].
- **Operaciones Guard Band.** En este modo, NB-IoT utiliza la capacidad del bloque de recursos físicos (PRB) de LTE y se implementa dentro de la banda de guarda de una portadora LTE. Se espera que este modo tenga menos interferencia en comparación con el funcionamiento en banda; además de un mejor rendimiento en el enlace descendente [9].

- **Operaciones In-band.** En este modo, NB-IoT también está diseñado para ser implementado en las redes LTE, ya sea utilizando la banda de guarda de LTE o PRBs (*Physical Resource Blocks*) de LTE, ocupando un ancho de banda de 180 kHz. [14]. En la Tabla 1.1 se muestran los índices de LTE PRB que se pueden implementar en las dos configuraciones de portadoras de NB-IoT sin interferencias en LTE-M. No es posible el funcionamiento en el ancho de banda de 1.4 MHz.

Tabla 1.1. Índices LTE PRB permitidos para conexión celular para In-band NB-IoT. [15]

Ancho de banda del sistema LTE	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Índices de LTE PRB por debajo de la subportadora para la sincronización NB-IoT	No soporta	2	2, 7	4, 9, 14, 19	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44
Índices de LTE PRB por encima de la subportadora para la sincronización NB-IoT	No soporta	12	17, 22	30, 35, 40, 45	42, 47, 52, 57, 62, 67, 72	55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95
Magnitud de desplazamiento	No aplica	7.5 kHz	7.5 kHz	2.5 kHz	7.5 kHz	2.5 kHz

#### 1.4.4.2 Esquema de transmisión

- **Modo Dúplex:** Inicialmente NB-IoT ha soportado la operación FDD (*Frequency Division Duplex*) sin embargo 3GPP en el Release 15 incluyó soporte para la operación TDD (*Time Division Duplex*). NB-IoT en modo semi-Dúplex FDD tipo B implica que el dispositivo no tiene que recibir simultáneamente en DL y transmitir en UL en el mismo tiempo. En la Tabla 1.2. se enumera todas las bandas de frecuencias compatibles con NB-IoT a partir del Release 15.
- **Operación en DL (Downlink):** utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiple-Access*), utilizando el mismo espaciado de subportadora, ranura, subtrama y longitud de trama que LTE (Long Term Evolution). La forma de onda del enlace se describe para 12 subportadoras y es la misma en los 3 modos de operación.
- **Operación en Uplink** utiliza SF-FDMA (*Single-Carrier Frequency-Division Multiple-Access*) con un espaciado de subportadora de 15 kHz para transmisiones multitono. También, admite transmisiones de un solo tono y en ese caso, las cuadrículas de recurso de frecuencia en tiempo pueden basarse con un espaciado de subportadora de 15 kHz o 3.15 kHz.
- **Bandas de Frecuencias**

3GPP define el rango de frecuencias permitidos para el enlace ascendente (UL) y descendente (DL) utilizadas en la red NB-IoT.

Tabla 1.2. Rango de Frecuencias definidas para NB-IoT. [15]

Número de banda	Rango de frecuencia DL / MHz	Rango de frecuencia UL / MHz
1	2110 - 2170	1920 - 1980
2	1930 - 1990	1850 - 1910
3	1805 - 1880	1710 - 1785
5	869 – 894	824 - 849
8	925 – 960	880 - 915
11	1475.9 - 1495.9	1427.9 - 1447.9
12	729 - 746	699 - 716
13	746 – 756	777 - 787
14	758 - 768	788 - 798
17	734 - 746	704 - 716
18	860 - 875	815 - 830
19	875 - 890	830 - 845
20	791 - 821	832 - 862
21	1495.9 - 1510.9	1447.9 - 1462.9
25	1930 -1995	1850 - 1915
26	859 - 894	814 - 849
28	758 - 803	703 - 748
31	462.5 467.5	452.5 - 457.5
41	2496 - 2690	2496 - 2690
66	2110 - 2200	1710 - 1780
70	1995 - 2020	1695 - 1710
71	617 - 652	636 - 698
72	461 - 466	451 - 456
73	460 - 465	450 - 455
74	1475 - 1518	1427 - 1470
85	728 - 746	698 - 716

### 1.4.4.3 Canales Físicos de NB-IoT

La Figura 1.6 muestra los canales físicos definidos para-NB-IoT.

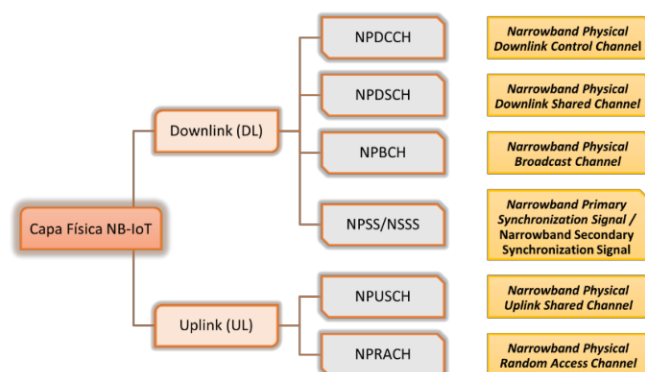


Figura 1.6. Canales de capa física de NB-IoT [14]

## Señales y Canales físicos en Downlink (DL).

NB-IoT para el enlace descendente (DL), se definen tres canales de físicos y tres canales de señalización, multiplexados en el dominio del tiempo (TDD) los cuales son:[14], [17].

### Canales Físicos:

Los canales físicos de enlace DL se modulan en QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*).

- **NPDCCH (*Narrowband Physical Downlink Control Channel*)**: es un canal de control y señalización en el enlace descendente y se utiliza para transferir información de control entre UE y eNB.
- **NPDSCH (*Narrowband Physical Downlink Shared Channel*)**: transmite datos de usuario y de control tanto dedicados como comunes a través del enlace descendente.
- **NPBCH, (*Narrowband Physical Broadcast Channel*)**: se utiliza para transmitir información a través del MIB (*Master Information Block*) en el enlace descendente que permite la conexión al sistema.

### Canales de Señalización:

- **NRS (*Narrowband Reference Signal*)**: se utiliza para permitir que el dispositivo realice la demodulación de los canales de enlace descendente y realice mediciones de calidad e intensidad de la señal de enlace en modo inactivo y conectado
- **NPSS (*Narrowband Primary Synchronization Signal*) y NSSS (*Narrowband Secondary Synchronization Signal*)**. Por un lado, NPSS se utiliza para obtener la sincronización del símbolo tanto en tiempo como en frecuencia de la portadora con una celda NB-IoT, mientras que el NSSS se utiliza para detectar la identidad de la celda, y adquirir más información sobre la estructura de la trama.

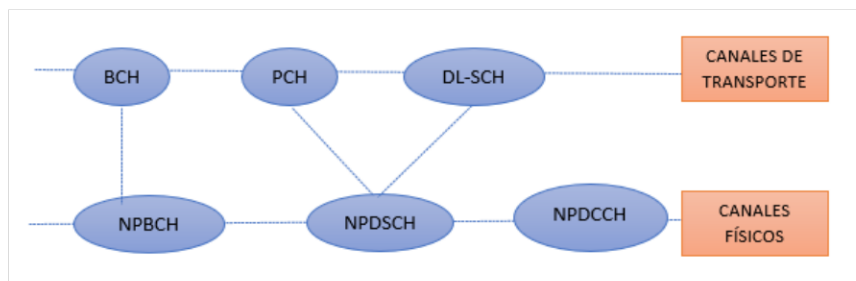


Figura 1.7. Mapeo de canales de transporte a canales físicos en el enlace DL [17].

## Señales y Canales físicos en Uplink (UL)

Enlace ascendente (UL) utiliza SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), similar al enlace ascendente LTE.

Los canales físicos de enlace ascendente (UL) están modulados en QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Existen dos canales físicos [14], [17]

- **NPUSCH (*Narrowband Physical Uplink Shared Channel*)**: se utiliza para la emisión de datos dedicados e información de control de enlace ascendente como acuse de recibo.
- **NPRACH (*Narrowband Physical Random Access Channel*)**: se utiliza para el acceso aleatorio en el enlace ascendente. Esto sucede cuando el equipo del usuario accede a la red por vez primera.

La conexión entre los canales de transporte y los canales asociados se muestra en la Figura 1.8.

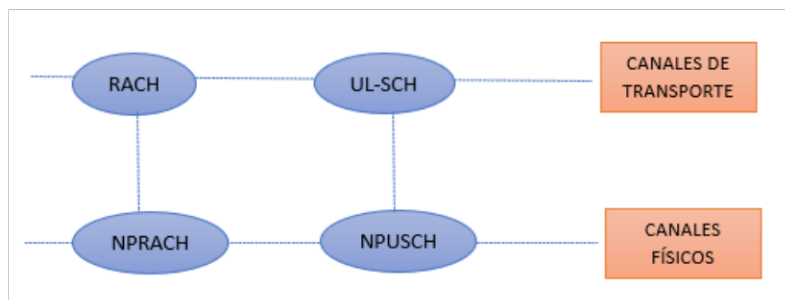


Figura 1.8. Mapeo de canales físicos y transporte en el enlace ascendente (UL) [17].

### 1.4.5 MÉTRICAS PARA QOS (QUALITY OF SERVICE).

Existen métricas importantes para evaluar el rendimiento del sistema tales como latencia, cobertura, duración de la batería y capacidad del sistema [18].

#### 1.4.5.1 Cobertura

En NB-IoT se definen tres clases de cobertura en el canal NPRACH: Cobertura normal, Cobertura extendida, y Cobertura extrema.

La mejora de la cobertura se alcanza a través del intercambio de tasas de datos por cobertura permitiendo certificar que los dispositivos en lugares alejados puedan tener una comunicación confiable con la red, así sea con una velocidad de datos muy baja o reducida

NB-IoT logra un MCL de 164 dBm, la cual es 20 dBm más alta que GPRS, por lo que tiene una mayor tolerancia a pérdidas. Además, si se varía la velocidad de datos aumentando el número de repeticiones se tiene una expansión de cobertura.

En la Tabla 1.3., se tiene valores específicos para cada canal de enlace. Las iteraciones requeridas para enviar un paquete de forma correcta dependerán de las medidas del QoS (Quality of Service).

Tabla 1.3. Retransmisiones en NB-IoT

	Canal	Repeticiones
Downlink	NPBCH	Fijado a 64 repeticiones
	NPDCCH	[1, 2, 4, 8, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048]
	NPDSCH	[1, 2, 4, 8, 32, 64, 128, 192, 256, 384, 512, 768, 1024, 1536, 2048]
Uplink	NPRACH	[1, 2, 4, 8, 32, 64, 128]
	NPUSCH	[1, 2, 4, 8, 32, 64, 128]

#### 1.4.5.2 Latencia

Las métricas que tiene el NB-IoT se enfocan en mejorar la cobertura, duración prolongada de la batería y la capacidad del sistema para reducir la latencia [19].

La latencia en NB-IoT se encuentra entre 1.6 a 10 segundos y depende de:

- Tamaño del bloque de transporte; relacionado con el tiempo de transmisión requerido y, por tanto, la cantidad de recursos de *scheduling*
- Numero de repeticiones debido que NB-IoT permite repeticiones dependiendo de la ubicación del UE.
- Modo de implementación de la red: Debido a que NB-IoT se puede implementar en los tres modos de operación con un presupuesto de enlace diferente.
- Configuración del eDRX y PSM; cuando los dispositivos NB-IoT no siempre están en estado listening, porque DL debe esperar a que el dispositivo se active según las configuraciones de eDRX/PSM.

#### 1.4.5.3 Duración de la Batería.

Esta métrica se ve afectada principalmente por el comportamiento del dispositivo y la duración del estado de conexión RRC (*Radio Resource Control*), y no debido a la red. Reducir el consumo de energía mediante cortes, ayuda en la eficiencia energética del dispositivo brinde una mayor duración y extienda el tiempo de vida de la batería. [18].

En los Releases 12 y 13 del 3GPP se introdujo el modo cobertura discontinua extendida (eDRX) y también el modo de ahorro de energía (PSM) para admitir este tipo de trabajo y mejorar el consumo eléctrico del dispositivo. Esencialmente, el dispositivo puede apagar el transceptor y permitir que se ejecute un oscilador para mantener una referencia del tiempo constante al cual debe salir del modo PSM o eDRX.[13]

## **2 METODOLOGÍA**

En el presente capítulo, se define los parámetros utilizados en este trabajo como: la descripción del enfoque del estudio, las técnicas de recolección de información, así como el análisis del estudio.

### **2.1 PRINCIPIOS PARA LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Este trabajo inicia con la presentación de los conceptos de NB-IoT, así como los casos de uso de esta tecnología, sus ventajas y desventajas.

Posteriormente se proponen los escenarios que permitan el análisis de NB-IoT en base a la latencia del servicio, consumo de energía, duración de la batería para dispositivos, rendimiento de la cobertura y modelos de propagación de acuerdo con el entorno.

Para cumplir los objetivos planteados se definen dos métodos: Documental y Experimental.

#### **2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DOCUMENTAL**

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó una técnica de búsqueda de la información, con el apoyo de fuentes como libros, revistas científicas, documentos, etc. Luego, se realiza un análisis y depuración de la información recopilada para la elaboración del marco teórico de la tecnología NB-IoT.

Esta metodología describe un procedimiento de investigación basado en la guía PMBOX [20].

##### **2.1.1.1 Guía PMBOK**

La Guía PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) es un estándar desarrollado por el PMI (*Project Management Institute*) basada en el criterio de "buenas prácticas" con un reconocimiento internacional. Esta guía describe las normas, métodos proceso y prácticas establecidos para llevar a cabo proyectos individuales cumpliendo los requisitos planteados.

En la guía de PMBOK se muestra las 5 etapas que intervienen en la realización de cualquier proyecto como se indica en la Figura 2.1[20], las cuales han sido acopladas para la realización del siguiente trabajo.

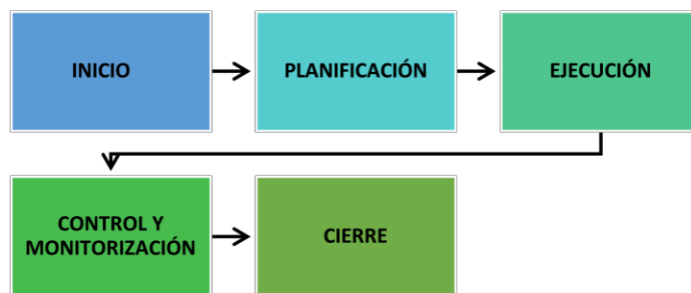


Figura 2.1. Etapas en la realización de proyectos según la Guía PMBOK [20]

### Fase de Inicio

Comienza con el estudio de la tecnología NB-IoT basándose en artículos científicos, libros etc., obteniendo así la información necesaria que permita crear las etapas que se requieran para el inicio y fin del proyecto dentro del alcance previamente establecido y autorizado.

### Fase de Planificación

Se define el alcance y los objetivos planteados, así como las actividades que se requieren para realizar el estudio de la tecnología NB-IoT. La Figura 2.2, muestran las actividades que se deben realizar para que cada objetivo del proyecto de titulación se ejecute con éxito.

### Fase de Ejecución

En esta etapa se definen los parámetros considerados para generar las simulaciones de los escenarios en Matlab. En la Tabla 2.1 se describen los parámetros considerados para la fase de ejecución.

Tabla 2.1. Parámetros de Ejecución basándose en la guía PMBOK

Parámetros	Descripción
Datos de entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoger el escenario para el estudio.</li> <li>• Número de nodos o dispositivos fijos de acuerdo con cada escenario.</li> <li>• Los parámetros utilizados para evaluar la latencia, consumo de energía y duración de la batería están establecidos en el script.</li> <li>• En el script se establecen parámetros para evaluar las pérdidas de trayectoria según el escenario.</li> <li>• Ingresar los paquetes y la velocidad del enlace UL y DL para su análisis.</li> </ul>
Procesamiento de Datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo del enlace en base al modelo matemático y escenario correspondiente</li> </ul>
Datos de salida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados del enlace de acuerdo con el escenario escogido.</li> </ul>
Gráficas con los resultados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graficar los resultados de acuerdo con el escenario escogido</li> </ul>



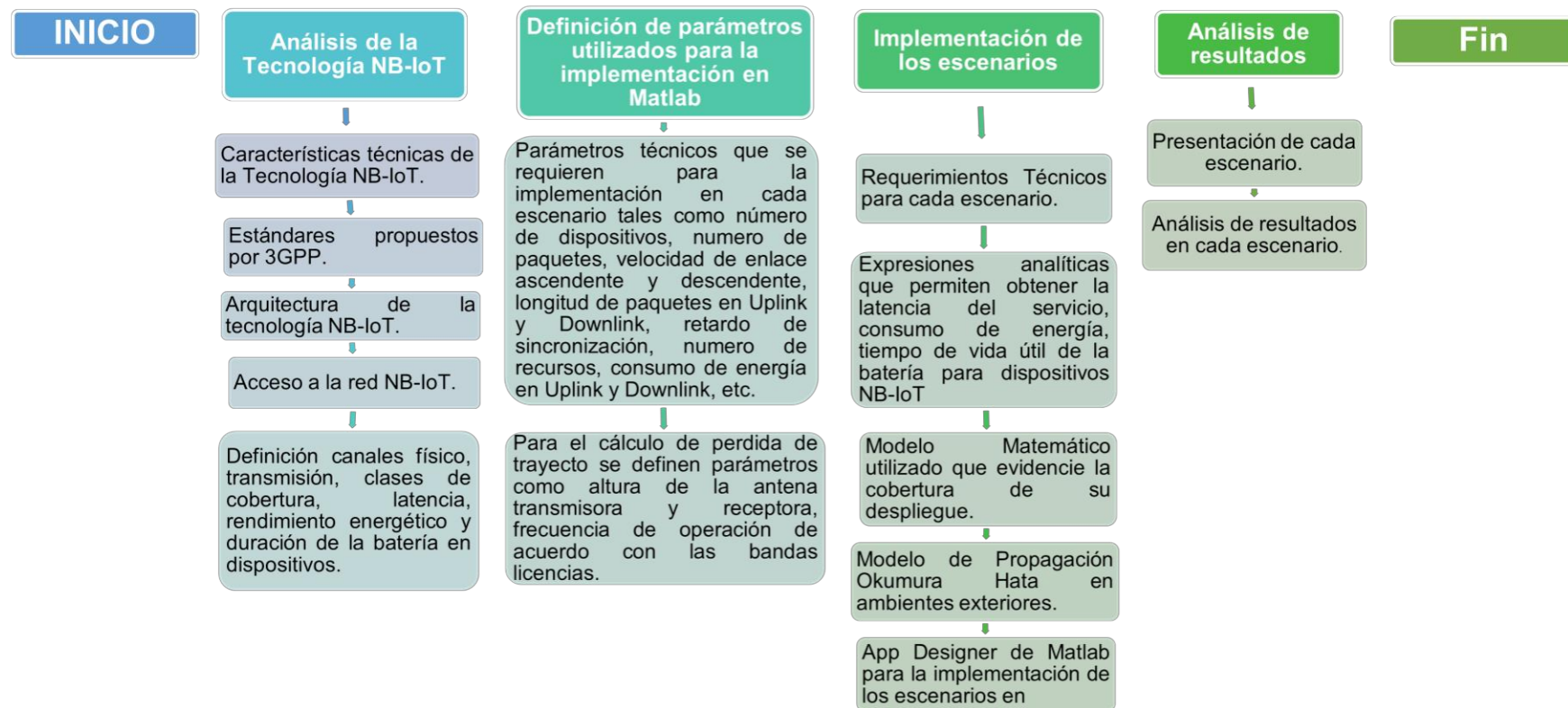


Figura 2.2. Actividades que desarrollar para cumplir con cada objetivo planteado.

## Fase de Monitoreo y Control

Esta fase permite evaluar, recolectar datos, verificar y analizar el desempeño de las simulaciones implementadas, de acuerdo con la planificación propuesta previamente, con el fin de contribuir información del comportamiento de NB-IoT en el medio. Para el presente proyecto, se muestra en la Tabla 2.2, que explican la calidad de la interfaz a desarrolla.

Tabla 2.2. Fase de monitoreo y control basado en la guía PMBOK.

Parámetros	Descripción
<b>Eficacia de la Interfaz</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Interfaz en Matlab que determine la calidad y la funcional con todos los parámetros sugeridos.</li></ul>

## Fase de Cierre

Para cerrar el proyecto, la evidencia en esta etapa es el documento escrito y los escenarios de simulación, lo que permite verificar la finalización del proyecto y que se cumplieron con los objetivos planteados.

### 2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

El método experimental busca identificar y cuantificar las características del desempeño de la tecnología NB-IoT bajo condiciones estrictamente controladas, para obtener información y los datos requeridos sobre una situación o evento en particular. Se diferencia de otros tipos de métodos en que los objetivos y el desarrollo dependen totalmente del investigador y de las decisiones que toma para guiar el experimento. Después de dar la definición, se toma en cuenta que el investigador pueda generar variables que permitan desarrollar el estudio[21].

En la Figura 2.3 se indican las etapas que permiten el desarrollo del proyecto de titulación.



Figura 2.3. Fases del método experimental para el desarrollo del proyecto de titulación.

### 2.1.2.1 Fase Ejecutiva

Las variables de entrada y las operaciones de simulación se gestionan para cada escenario propuesto, evidenciados en Matlab, mismos que contiene el código de la tecnología NB-IoT apropiados para cada parámetro definido, lo que permite analizar los datos de salida.

### 2.1.2.2 Fase Analítica

Una vez que se han procesado los datos, se puede evidenciar los resultados mediante la interfaz de App Designer de Matlab. Al terminar la ejecución del programa, se generan gráficas resultantes, evidenciando la operatividad de la interfaz.

### 2.1.2.3 Fase Expositiva

Elaboración del documento de final.

## 2.2 PROCEDIMIENTO DE LAS ACTIVIDADES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

La Figura 2.4 presenta las actividades que permiten la implementación y puesta en marcha de las simulaciones.

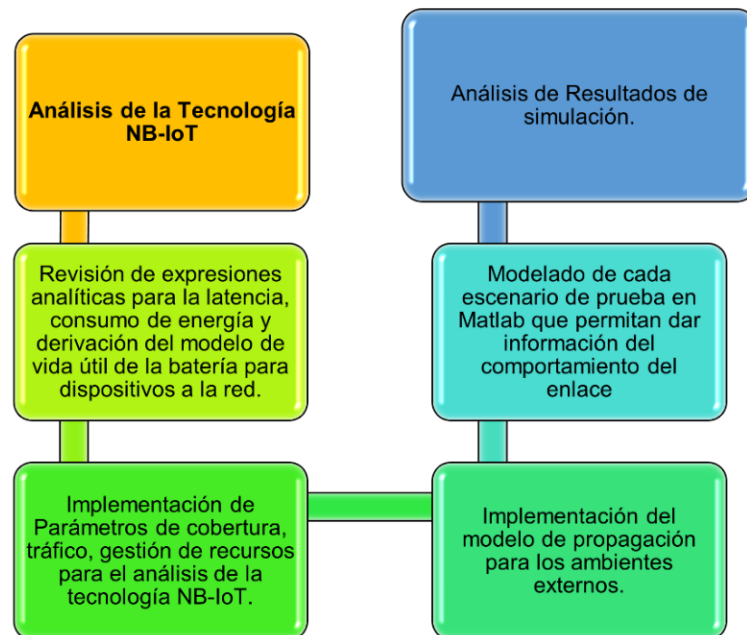


Figura 2.4. Actividades para el proceso de simulación

### 2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS PARA ANÁLISIS DE NB-IOT.

Los escenarios simulación propuestos permiten analizar el comportamiento de NB-IoT. Estos escenarios se centran para ambientes externos con línea de vista (LOS).

### 2.2.1.1 ESCENARIOS 1: Ambiente Externo con 10 nodos

El primer Escenario propuesto se muestra en la Figura 2.5. Se trata de una red NB-IoT de ambiente externo compuesta de una BS (*Base Station*) y 10 nodos ubicados aleatoriamente en línea de vista. En el diagrama, los módulos NB-IoT brindan funcionalidad IoT (*Internet of Things*), acceden a Internet a través de proveedores de servicios y, permiten a los usuarios acceder al servicio a través de una conexión inalámbrica para realizar varias operaciones de monitoreo dependiendo de la aplicación.

NB-IoT presenta canales físicos y de señalización donde la asignación de recursos en enlaces ascendente y descendente permita el análisis de latencia y consumo de energía de los dispositivos IoT en la transmisión de datos a través de esta tecnología. Los que se obtienen presentan la duración de la batería para dispositivos NB-IoT, rendimiento de la cobertura en función del número dispositivos conectados, resultados de pérdida de propagación en zonas urbanas, suburbanas y rurales.

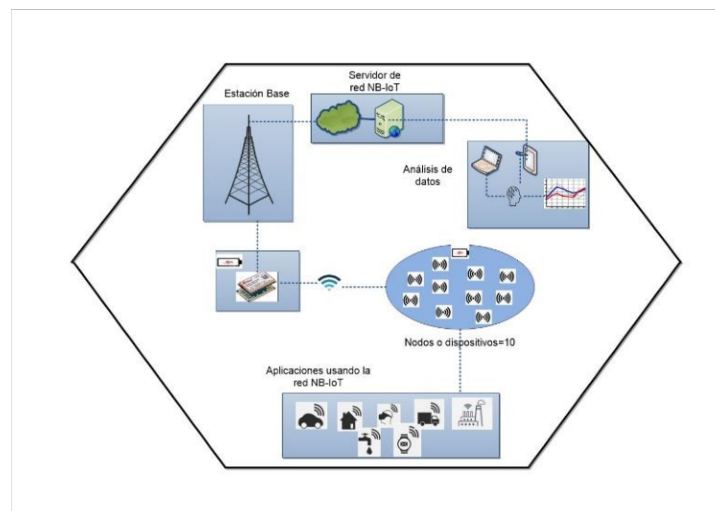


Figura 2.5. ESCENARIO 1: Ambiente Externo con N=10.

### 2.2.1.2 ESCENARIO 2: Ambiente Externo con N=80.

Como se muestra en la Figura 2.6, el segundo escenario propuesto se trata de una red que utiliza tecnología NB-IoT en un entorno exterior, que consta de una BS (*Base Station*) y 80 nodos colocados aleatoriamente en línea de vista.

Asimismo, NB-IoT muestra 5 canales físicos y 3 canales de señalización. Donde al asignar recursos de enlace ascendente y descendente en distintas clases de coberturas, permite analizar el rendimiento del sistema y ejecución del servicio en términos de latencia y el consumo de energía. Además, los resultados también permiten obtener las pérdidas de

trayectoria de los diferentes dispositivos conectados en áreas urbanas, suburbanas y rurales.

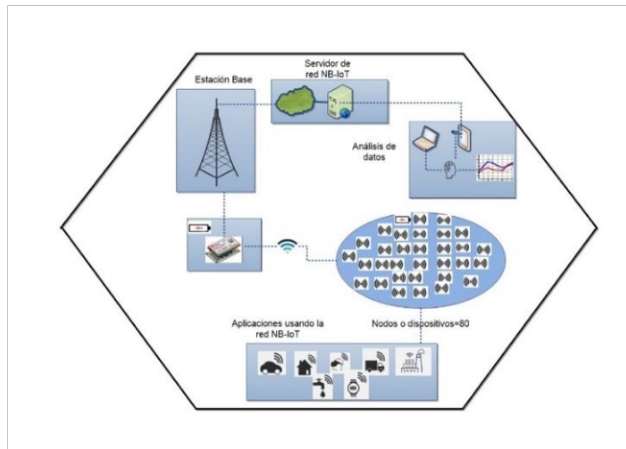


Figura 2.6. ESCENARIO 2: Ambiente Externo con N=80

### 2.2.1.3 ESCENARIO 3: Ambiente Externo con N=300

La Figura 2.7 representa el escenario 3 para una red en ambiente externo utilizando la tecnología NB-LoT compuesta por 300 nodos ubicados aleatoriamente en la línea de vista con una BS (*Base Station*).

Al asignar recursos de enlace ascendente y descendente, es posible analizar la latencia y el consumo de energía de los dispositivos IoT durante la transmisión de datos a través del sistema NB-LoT. Los resultados obtenidos mostrarán la duración de la batería de los dispositivos NB-LoT, el rango efectivo depende de la cantidad de dispositivos conectados, y las pérdidas de propagación en áreas urbanas, suburbanas y rurales.

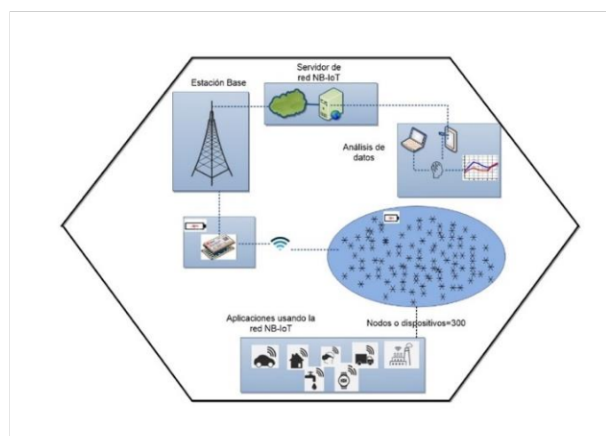


Figura 2.7. ESCENARIOS 3: Ambiente Externo con N=300

## 2.2.2 LATENCIA Y CONSUMO DE ENERGÍA EN ENLACES UPLINK Y DOWNLINK EN REDES NB-IOT.[22]

En general, una celda NB-IoT define 3 clases de cobertura ( $C$ ) normal, extendida y extrema, para dar servicio a dispositivos con recursos limitados con diversos niveles de pérdida de trayecto, donde la BS, en función de las pérdidas de ruta estimada, asigna una clase a un dispositivo y le notifica de su asignación. Sin embargo, este trabajo se enfoca en dos clases de cobertura normal ( $c=1$ ) y extrema ( $c=2$ ). La primera clase de cobertura corresponde con la pérdida de trayectoria normalizada, mientras que la segunda, mantiene los requisitos de latencia y rendimiento, corresponde a grupos que tienen pérdidas de trayectoria extremas.

Adicionalmente, la tasa de llegada de solicitudes de servicio del enlace ascendente y descendente al sistema se puede calcular como:

$$G_u = \frac{S p_u N}{24 \cdot 3600} s^{-1}, G_d = \frac{S N (1 - p_u)}{24 \cdot 3600} s^{-1}, \quad (2.1)$$

Donde,

$S$ : Número de paquetes IoT realiza por día,

$p_u$ : probabilidad de que un dispositivo requiera el servicio en enlace ascendente,

$N$ : Número de dispositivos,

$p_d = 1 - p_u$ : probabilidad que un dispositivo requiera servicio en enlace DL.

Primero, se verifica la información de la celda, es decir, NPSS y NSSS, cuando un dispositivo NB-IoT requiere un servicio de enlace ascendente y descendente, y luego utilizando esta información se sincroniza con la BS. Luego, el dispositivo realiza una reserva de acceso enviando una solicitud RA a las BS en el NPRACH. La BS responde con éxito la solicitud de acceso RA enviando un mensaje de respuesta RAR (*Random Access Response*) sobre el NPDCCH, indicando los recursos reservados para el dispositivo.

Finalmente, el dispositivo envía y recibe datos hacia y desde la BS en función de los canales NPUSCH/NPDSCH, seguido de un ACK (*acknowledgment*) dependiendo de la aplicación. Este proceso está diseñado para un ahorro de energía significativo, dado que los dispositivos IoT no necesitan reiniciar todos los pasos del proceso de establecimiento de la conexión. La Figura 2.8 se muestra los intercambios realizados para NB-IoT.

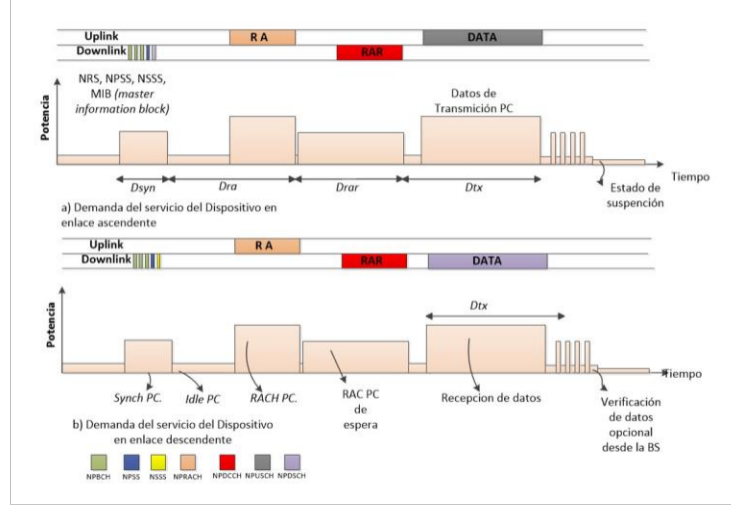


Figura 2.8. Intercambios de comunicaciones y consumo de energía en NB-IoT.

De acuerdo con la Figura 2.8, la latencia total en la comunicación para una solicitud de servicio de enlace ascendente/descendente en base a la clase  $j$  ( $c=1$  pérdida de ruta normal y  $c= 2$  para pérdida de ruta extrema) son respectivamente.

$$D_{uj} = D_{syj} + D_{txj} + D_{rrj} \quad (2.2)$$

$$D_{dj} = D_{syj} + D_{rxj} + D_{rrj} \quad (2.3)$$

Donde,

$D_{syj}$ : tiempo estimado en la sincronización.

$D_{txj}$ : tiempo de transmisión de datos en el servicio de enlace ascendente.

$D_{rxj}$ : tiempo en la recepción de datos en el servicio de enlace descendente.

$D_{rrj}$ : tiempo en la reserva de recursos.

El consumo promedio de energía en los servicios de enlace ascendente y enlace descendente en la clase  $j$  están dados por:

$$\xi_{uj} = E_{syj} + E_{txj} + E_{rrj} + E_s \quad (2.4)$$

$$\xi_{dj} = E_{syj} + E_{rxj} + E_{rrj} + E_s \quad (2.5)$$

Donde,

$E_{syj}$ : consumo de energía estimado en sincronización.

$E_{txj}$ : consumo de energía en transmisión de datos en uplink.

$E_{rx_j}$ : consumo de energía en la recepción de datos en downlink.

$E_{rr_j}$ : consumo de energía en la reserva de recurso.

$E_s$ : consumo de energía en comunicaciones opcionales como por ejemplo acuse de recibo

La vida útil esperada de la batería se puede definir como la relación entre la energía almacenada y la energía consumida, debido a que el consumo de energía de un dispositivo se puede modelar como un proceso de Poisson. En este caso, la vida útil esperada de la batería se puede calcular como:

$$L_j = \frac{E_0}{\xi_{uj}p_uS + (1 - p_u)S\xi_{dj}} [\text{dias}] \quad (2.6)$$

Donde,

$E_0$ : energía almacenada en la batería del dispositivo,

$\xi_{uj}$ : consumo promedio de energía en uplink.

$\xi_{dj}$ : consumo promedio de energía en downlink.

### 2.2.3 MODELO DE COLA DEL PROTOCOLO DE ACCESO EN NB-IOT.[22]

En los sistemas NB-IoT, los canales de control, datos, acceso aleatorio y transmisión se multiplexan en el mismo conjunto de recursos de radio. Por lo tanto, su impacto mutuo en enlace ascendente y descendente es significativo. El modelo de colas de redes de acceso NB-IoT, captura estas interacciones.

La técnica de acceso aleatorio de enlace ascendente/descendente, control y canales de datos como se muestra en la Figura 2.9, donde se modelan a dos servidores que trabajan para un sistema de colas de tráfico. El círculo rosa representa el servidor de enlace ascendente que atiende colas de dos canales, NPRACH y NPUSCH, mientras que el círculo azul representa el canal de enlace descendente que atiende colas de tres canales, NPDCCH, NPDSCH, NPSS, así como las señales de referencia.

Sea  $t_j$  el intervalo de tiempo promedio entre dos scheduling consecutivas de NPRACH de clase  $j$  y  $M_j$  el número de preámbulos ortogonales de acceso aleatorio disponibles en él. El periodo de clase  $j$  de NPRACH es  $c_j\tau$ , donde  $\tau$  es la longitud unitaria del NPRACH para la clase de cobertura denota como  $c_j = 1$ .

Finalmente, 3GPP ha propuesto un *scheduling* semirregular de NPDCCH para evitar desperdiciar los recursos del canal de enlace ascendente cuando la estación base está



sirviendo a otros dispositivos con una cobertura de enlace descendente deficiente; se expresa el intervalo de tiempo medio entre dos NPDCCH como  $d$ .

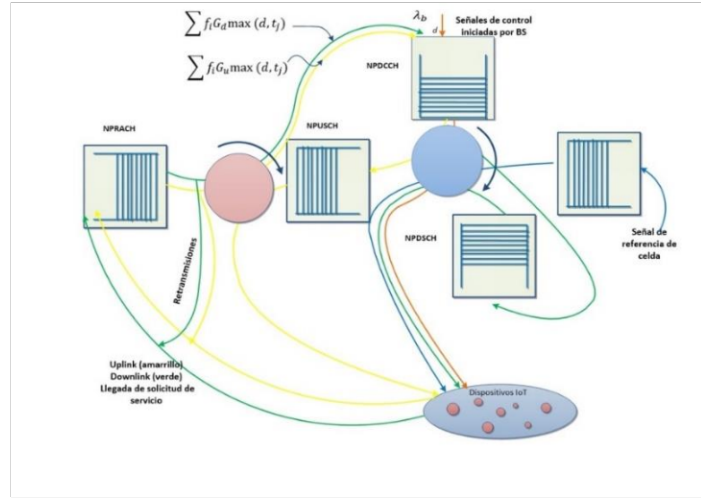


Figura 2.9. Sistema de colas en la red de acceso NB-IoT.

### 2.2.3.1 Expresiones matemáticas para los parámetros utilizados en la Simulación

Las expresiones para el cálculo de la latencia  $D_{rrj}$  está dada por:

$$D_{rrj} = \sum_{l=1}^{N_{rmax}} P_j l (1 - P_j)^{l-1} (D_{rarj} + D_{raj}) \quad (2.7)$$

Donde,

$N_{rmax}$  representa el número máximo de intentos permitidos, mientras  $P_j$  depende de la clase de dispositivos que intentan conectarse al sistema.

$D_{rarj}$ : representa la latencia esperada en la recepción del mensaje RAR.

$D_{raj}$ : representa la latencia esperada en la transmisión envío de un mensaje RA.

La latencia en la recepción  $D_{raj}$ , representa una función del tiempo entre el *scheduling* de NPRACH y el tiempo medio de servicio. Mientras que  $D_{rarj}$  depende del funcionamiento de NPDCCH. Además, en la Figura 2.9, se observa a NPDCCH como un sistema de colas, en el que el servidor downlink visita la cola cada  $d$  segundos y atiende las solicitudes existentes.

Por tanto, se expresan de la siguiente manera:

$$D_{ra_j} = \tau c_j + \frac{1}{2} t_j \quad (2.8)$$

$$D_{rar_j} = \frac{1}{2} t_d + u c_j + \frac{1}{2} D_t Q \quad (2.9)$$

Donde,  $Q$  es el número de solicitudes de acceso aleatorio iniciadas por NPRACH que el servidor puede manejar en la cola y  $D_w$  el tiempo de espera promedio antes de iniciar una nueva solicitud de RA entrante

$$Q = \sum_{j=1}^c [f_j (G_d + G_u) \max\{t_j, t_d\}] + \{t_d + \lambda_{bs}\} \quad (2.10)$$

$$D_w = \frac{1}{2} Q D_t \quad (2.11)$$

Siendo  $\lambda_{bs}$ , la tasa de llegada de señales de control iniciadas por BS.

En el canal descendente (NPDCCH), el tiempo promedio de servicio es denotado  $D_t$  en base a la clase  $j$  de transmisión se tiene  $D_{tj} = c_j \cdot u$ .

Por tanto, se obtiene

$$D_t = \sum_{j=1}^c f_j D_{tj}; \quad D_t = \sum_{j=1}^c f_j c_j u; \quad (2.12)$$

Siendo  $u$  el tiempo para el envío de tramas de control.

Si el preámbulo enviado por el dispositivo no entra en conflicto con los encabezados de otros nodos, la reserva de recursos del dispositivo en NPRACH tendrá éxito con una probabilidad  $P_{jRACH}$ . Por lo tanto, la probabilidad de una reserva de recursos exitosa se puede aproximar como  $P_j = P_{jRACH} P_{jRAR}$ .

La clase de nodo esta presentada por  $j$  y los preámbulos ortogonales disponibles cada  $t$  segundos son  $M_j$ , con un contenido de  $N_j$  de nodos. Se tiene  $P_{jRACH}$

$$P_{jRACH} = \sum_{k=2}^N \frac{(N_j)^k (M_j - 1)^{k-1} e^{-N_j}}{k! (M_j)^{k-1}}, \quad \text{siendo } N_j = f_j (G_d + G_u) t_j \quad (2.13)$$

siendo,  $K$  el número de ocurrencia del evento

En un dispositivo el tiempo de servicio está en la función de distribución acumulativa ( $F_1(x)$ ) y la suma total del tiempo de servicio para  $n > 1$ . Donde,  $H(x)$  representa la función escalón unitario:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^c H(x - c_j u) f_j \quad (2.14)$$

$$F_n(x) = \sum_{j=1}^c F_{n-1}(x - c_j u) f_j \quad (2.15)$$

Para  $P_{jRAR}$  la probabilidad de que el mensaje (RAR) es recibida dentro de  $T_{th}$  donde muestra la cantidad de solicitudes en cola que potencialmente deben ser atendidas por  $K$ , expresada por:

$$P_{jRAR} = 1 - \sum_{K=2}^{\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \frac{Q^k k}{e^Q K K!} (F_{K-k-1}(T_{th})) (1 - F_{K-k}(T_{th})) \quad (2.16)$$

El canal NPUSCH es el sistema de colas donde el servidor analiza las solicitudes en una fracción de cada trama denotado  $w$ . El valor  $w$  puede ser calculado:

$$w = 1 - \sum_{j=1}^c (\tau c_j) (t_j)^{-1} \quad (2.17)$$

La llegada de solicitudes de servicio al NPUSCH se puede moldear como un proceso BPP (*Batch Poisson Process*), debido a que la reserva de recursos se realiza únicamente en períodos NPRACH. Donde el tamaño medio de  $g$  expresado de la siguiente manera:

$$g = \frac{\sum_{j=1}^c f_j t_j G_u}{c} \quad \text{siendo la tasa de llegada } \sum_{j=1}^c \frac{1}{t_j} \quad (2.18)$$

El tiempo de servicio de los paquetes en enlace ascendentes se define como:  $S_a$  y  $S_b$ . Asumiendo la longitud del paquete como una distribución general con los dos primeros momentos ( $l_a$  y  $l_b$ ).

$$S_a = \frac{1}{w} \sum_{j=1}^c \frac{f_j l_a c_j}{R_j} \quad \text{y} \quad S_b = \sum_{j=1}^c \frac{c_j^2 f_j l_b}{(w R_j)^2} \quad (2.19)$$

Por lo tanto, se determina la latencia en los datos de transmisión en enlace ascendente para la clase  $j$  como:

$$D_{txj} = \frac{R_j w \rho S_b + R_j w G (S_a)^2 + 2 S_a (1 - \rho) c_j l_a}{2 R_j w S_a (1 - \rho)} \quad \text{siendo, } \rho = \sum_{j=1}^c S_a G (t_j)^{-1} \quad (2.20)$$

Donde,  $R_j$ : representa la velocidad de transmisión promedio de los datos de enlace ascendente para la clase  $j$  y,  $\rho$  la probabilidad de solicitud para UL.

Del mismo modo, para el canal del enlace descendente (NPDSCH) se modela como un sistema para manejar la cola en el servidor el cual responde a mensajes de solicitudes en una fracción de tiempo. Esta fracción y se compone de subtramas con NPDCCH, NPBCH, NPSS y NSSS no planificadas representadas de la siguiente manera:

$$y = \frac{1}{td} (td - b \cdot td - Q) \sum_{j=1}^c c_j f_j u \quad (2.21)$$

Asimismo, la llegada de solicitudes al NPDSCH también se puede realizar como un proceso BPP expresado:

$$g = \sum_{j=1}^c \frac{f_j t_j G_d}{c} \text{ siendo la tasa de llegada } \sum_{j=1}^c \frac{1}{t_j} \quad (2.22)$$

La longitud del paquete sigue una distribución general con los dos primeros momentos  $m_a$  y  $m_b$ , por tanto, el tiempo de transmisión en los dos momentos iniciales para el DL  $h_a$  y  $h_b$  son:

$$h_a = \frac{1}{y \mathbb{R}_j} \sum_{j=1}^c m_a f_j c_j; \quad y \quad h_b = \frac{1}{(y \mathbb{R}_j)^2} \sum_{j=1}^c m_b f_j c_j^2 \quad (2.23)$$

Siendo,  $\mathbb{R}_j$  es la tasa de datos del enlace descendente de datos de la clase  $j$ .

y,  $v$  la probabilidad de solicitud para DL

Por tanto, la latencia en los datos recibidos  $D_{rxj}$  se puede calcular de la siguiente manera:

$$D_{rxj} = \frac{\mathbb{R}_j y v h_b + \mathbb{R}_j y g (h_a)^2 + 2 h_a (1 - v) c_j m_a}{2(1 - v) h_a \mathbb{R}_j y} \quad \text{donde } v = \frac{1}{t_j} \sum_{j=1}^c h_a \quad (2.24)$$

Finalmente, el consumo de energía promedio de los servicios de enlace ascendente y descendente se determina de la siguiente manera.

Para el consumo de energía estimada en estado de sincronización  $E_{syj}$ :

$$E_{syj} = D_{syj} \cdot P_l \quad (2.25)$$

$$E_{rarj} = D_{rarj} \cdot P_l \quad (2.26)$$

Para el consumo de energía en transmisión de datos en Uplink  $E_{txj}$ :

$$E_{txj} = P_l \left( \frac{R_j \omega D_{txj} - c_j l_a}{\omega R_j} \right) + \frac{(\xi P_{tj} + P_c) l_a c_j}{\omega R_j} \quad (2.27)$$

Para el consumo de energía en la recepción de datos en Downlink  $E_{rxj}$ :

$$E_{rxj} = P_l \left( \frac{\mathbb{R}_j y D_{rxj} - c_j m_a}{y \mathbb{R}_j} \right) + P_l \frac{m_a c_j}{y \mathbb{R}_j} \quad (2.28)$$

Para el consumo de energía en la reserva de recurso  $E_{rrj}$ :

$$E_{rrj} = \sum_{l=1}^{N_{rmax}} P_j (1 - P_j)^{l-1} (E_{rarj} + E_{raj}) \quad (2.29)$$

$$E_{raj} = P_l (D_{ra} - c_j \tau) + c_j \tau (P_c + \xi P_{tj}) \quad (2.30)$$

Además: el modelo de duración de la batería se expresa como:

$$L_j = E_o \left( S_p [E_{syj} + E_{rrj} + E_{txj} + E_s] \right) + \frac{S(1-p)}{[E_{syj} + E_{rrj} + E_{txj} + E_s]} \quad (2.31)$$

Donde,

$\xi$ : expresa la eficiencia del amplificador de potencia

$P_l$ : Consumo de potencia en estado de reposo

$P_c$ : consumo de potencia del circuito de transmisión.

$P_l$ : consumo de potencia en estado listening.

$P_{tj}$ : consumo de potencia en transmisión para la clase  $j$ .

## 2.2.4 MODELO DE PROPAGACIÓN

Los modelos de propagación se utilizan para determinar las áreas de cobertura necesarias para proporcionar cobertura a la red. Están diseñados para realizar cálculos de pérdida producidas por el desvanecimiento por múltiples trayectorias de las señales que viajan entre el transmisor y receptor. Estas son medidas en dos ubicaciones diferentes con parámetros como frecuencia, distancia, altura y el entorno que incluyen desvanecimiento por múltiples trayectos entre otras variables presentes. [16] .

Debido a la presencia de varios obstáculos los factores que intervienen en la propagación, es casi imposible cuantificar los efectos de cada uno; por tanto, lo que se pretende determinar es el comportamiento de la señal que viaja de un extremo a otro (enlace) proporcionando valores aleatorios con distribución log-normal de la pérdida de trayectoria; es decir dan a conocer una estimación razonable si la señal transmitida, llega o no al punto del receptor [17] .

Los modelos de propagación han ido evolucionando y se continuara modificando en función del desarrollo de los sistemas celulares, la cobertura, la densidad de cada área poblacional (según el ambiente), y de diferentes criterios de uso. En la Figura 2.10 muestra la clasificación de los modelos de propagación.

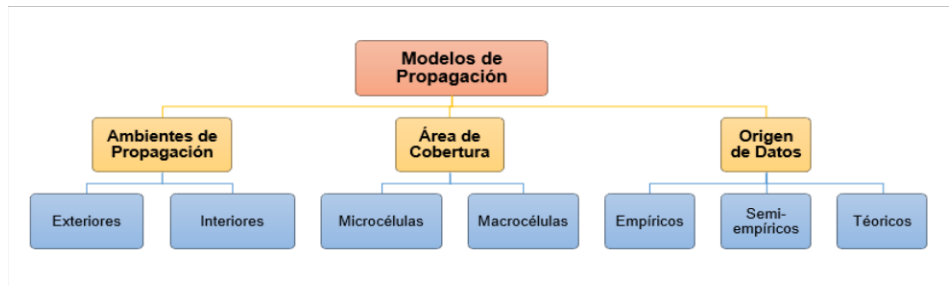


Figura 2.10. Clasificación de los modelos de propagación según el ambiente [17]

### 2.2.4.1 Modelo de Propagación para ambientes Externos

En los modelos para exteriores la clasificación puede basarse en el área de cobertura, abarcando un gran número de entornos en los que la propagación es muy variable.

En este trabajo, el modelo que más se adapta para simulaciones en Matlab en diferentes escenarios con un sistema externo es el Modelo de propagación Okumura-Hata.

#### Modelo Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata como se muestra en la Figura 2.11, es uno de los modelos empíricos más utilizado y adecuados para las predicciones de atenuación en sistemas celulares y de radio terrestre, en entornos residenciales más concurridos. Consiste en un conjunto de ecuaciones simples que permite estimar las pérdidas de propagación en diferentes tipos de áreas (urbana pequeña, urbana en ciudad grande, suburbana y abierta o rural) según la altura de las antenas, tanto de la estación base como la móvil, la frecuencia de operación, y la distancia entre el emisor y receptor [17].

El modelo debe también tomar en cuenta el porcentaje de edificios que se encuentran en la trayectoria. La Tabla 2.3 describe los principales parámetros con sus correspondientes rangos a considerar para el cálculo de pérdida de propagación de la señal transmitida.

Tabla 2.3. Parámetros considerados para aplicar el modelo de Okumura-Hata.

Parámetro	Altura del transmisor	Altura del receptor	Distancia del enlace	Frecuencia
Rango establecido para el Modelo Okumura-Hata	30-200 [m]	1-10[m]	1-20 [Km]	150-1500 [MHz]

Existen algunos aspectos que se deben considerar para el cálculo de pérdida de trayecto basados en el modelo de propagación Okumura-Hata que son:

- Ubicación de las antenas en el transmisor y receptor.
- Frecuencia de la portadora
- Ambiente (urbano, suburbano, espacios abiertos o áreas de terreno montañoso.)
- Obstáculos presentes en la trayectoria del enlace.
- Potencia y sensibilidad del receptor.

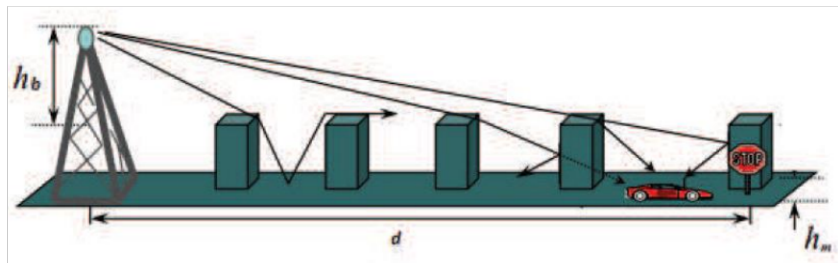


Figura 2.11. Modelo de propagación Okumura-Hata[17]

Considerando estos aspectos se establecen las siguientes ecuaciones que permiten el cálculo de la pérdida de trayecto en función del entorno.

### ▪ Área Urbana

Corresponde a ciudades masivamente urbanizadas, altas edificaciones, árboles o grandes urbanizaciones de casas o edificios.

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f_{c(MHz)}) \quad (2.32)$$

$$- 13.82 \log(ht_{(m)}) + [44.9 - 6.55 \log(ht_{(m)})] \log(d_{(km)}) - a(hre)$$

Donde,

$L_p(dB)$ : pérdidas de propagación.

$f_c$ : frecuencia de la portadora en MHz,

$ht$ : altura efectiva de transmisión en m,

$d$ : distancia entre transmisor (Tx) y receptor (Rx) en Km,

$a(hre)$ : factor de corrección de altura de la antena móvil dependiendo del tamaño del área de la cobertura.

Según el tipo de ciudad el factor de corrección de la antena móvil  $a(hre)$  se define como:

### En ciudades pequeñas o medianas

El factor de corrección de la antena móvil  $a(hre)$  está dada por:

$$a(hre) = [1,1 \log f_{c(MHz)} - 0.7]hm_{(m)} - [1,56 \log f_{c(MHz)} - 0.8] \quad (2.33)$$

### En ciudades grandes

El factor de corrección  $a(hre)$  está dada por:

$$a(hre) = 8.29[\log(1.54hm_{(m)})]^2 - 1.1 \quad f \leq 300 \text{ MHz} \quad (2.34)$$

$$a(hre) = 3.2[\log(11.75hm_{(m)})]^2 - 4.97 \quad f \geq 300 \text{ MHz} \quad (2.35)$$

#### ▪ Área Suburbana

Áreas residenciales con edificaciones de baja altura.,

$$L50 = Lp(urbano) - 2 \left[ \log \left( \frac{f_{c(MHz)}}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (2.36)$$

#### ▪ Área abierta o Rural

Se caracteriza por tener espacios abiertos, es decir sin aboles, sin edificios altos, sin obstáculos en su entorno por lo tanto las pérdidas de propagación son:

$$L50 = Lp(urbano) - 4.78 \log(f_{c(MHz)})^2 + 18.33 \log(f_{c(MHz)}) - 40.94 \quad (2.37)$$

Donde,

$Lp(urbano)$ : Pérdidas de propagación de área urbana.

$hm$ : altura de la antena móvil en m.

#### 2.2.4.2 Pérdidas Máximas de Acoplamiento (MCL)

Las pérdidas máximas de acoplamiento se definen como una medida de la atenuación total máxima de la señal de radio entre el UE (*User Equipment*) y los puertos de la antena eNodeB (eNB). Además de la sensibilidad del receptor y del presupuesto del enlace, la 3GPP utiliza MCL para evaluar la mejor cobertura para la tecnología de acceso por radio. Como se muestra en la Figura 2.12 MCL se calcula como la diferencia entre los niveles de potencia radiada entre los puertos de la antena transmisora y receptora.[19]

$$MCL(dB) = P_{tx} - (Noise\ figure + SINR + Noise\ Floor) \quad (2.38)$$

$$Noise\ figure [NF] + SINR + Noise\ Floor = sensibilidad\ receptora$$

$$Noise\ Floor = -174 + 10 \log 10(bandaAncha)$$



Por otro lado, la *Maximum Path Loss* (MPL) evalúa la cobertura para la tecnología de acceso de radio. Por lo tanto, MPL se puede calcular a partir de la diferencia de los niveles de potencia radiada entre las antenas transmisora y receptora. También se debe considerar la ganancia de antena del transmisor y del receptor [19].

$$MPL(dB) = P_{tx} + Gain_{tx} + Gain_{rx} - (Noise\ figure + SINR + Noise\ Floor) \quad (2.39)$$

Donde,

$P_{tx}$ : representa la potencia de transmisión.

$Gain_{tx}$ : Ganancia de la antena Transmisora.

$Gain_{rx}$ : Ganancia de la antena receptora.

*Noise figure*: figura de ruido del receptor en (NF).

*SINR*: relación señal a ruido

*Noise Floor*: Nivel de ruido presente en la transmisión.

Tabla 2.4. Máxima atenuación permitida y la longitud máxima de alcance. [19]

Tecnología de acceso radio	Pérdidas Máximas de acoplamiento (MCL) en [dB]	Longitud (Km)	Figura de Ruido		Potencia Transmitida	
			Downlink [dB]	Uplink [dB]	Downlink [dBm]	Uplink [dBm]
NB-IoT	164 dB	10-15 [Km]	9	5	46	23

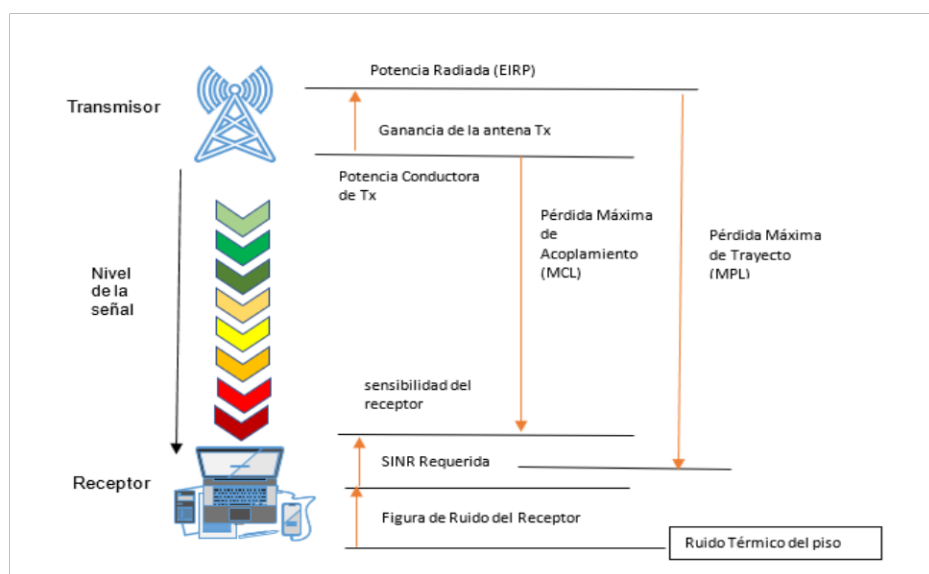


Figura 2.12. Pérdidas máximas de acoplamiento (MCL) y Pérdidas máximas de trayecto (MPL)[19].

## 2.3 DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS EN MATLAB

La herramienta utilizada para la implementación de los escenarios NB-IoT se los implementa utilizando Matlab versión R.2021a, basado en APP Designer Las simulaciones se implementan en función de tres escenarios diferentes.

App Designer es una herramienta que permite crear aplicaciones con en Matlab. Para crear cada aplicación, se divide en dos vistas, por un lado, *Vista de código* encargada de ejecutar todas las sentencias del programa. Por otro lado, *Vista de diseño*, la cual brinda una extensa biblioteca de componentes de interfaz de usuario, por lo que puede crear una variedad de funciones interactivas.

### 2.3.1 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA CADA INTERFAZ EN MATLAB

En esta sección, se realizan simulaciones a nivel de enlace para validar el rendimiento del sistema NB-IoT de los tres escenarios.

NB-IoT funciona con las bandas de frecuencia licenciadas, como se muestra en la Tabla 2.5. Sin embargo, para el análisis de este trabajo, se seleccionó una frecuencia de operación de 850 MHz.

Tabla 2.5. Rango de frecuencia para NB-IoT

Tecnología IoT	Rango Inicial [MHz]	Rango Final [MHz]	Rango de acuerdo con el modelo de propagación [MHz]
NB-IoT	800	2400	150-1500

La Figura 2.13 presenta la topología según cada escenario, la cual está compuesta por una celda que cubren un área total de 65 km<sup>2</sup>, con una BS (*Base Station*) ubicada en su centro, representada con color rojo y N dispositivos o nodos distribuidos aleatoriamente en el área de servicio. Los nodos están representados por un círculo (o) y se configuran de acuerdo con el escenario propuesto y los parámetros que se requiere para el análisis del sistema NB-IoT basándose en la Tabla 2.6.

Cada escenario tiene diferentes nodos previamente configurados, y en cada simulación, varían diferentes parámetros como el número de paquetes entregados por día y la velocidad de transmisión en los enlaces ascendente (UL) y descendente (DL), lo que permite el análisis de los canales de datos y control, así como la coexistencia de clases de cobertura, la latencia experimentada y la duración de la batería de los dispositivos IoT;

Además, la simulación incluye el cálculo de la pérdida de ruta con el modelo Okumura-Hata, MCL lo cual indica la calidad del enlace en el entorno.

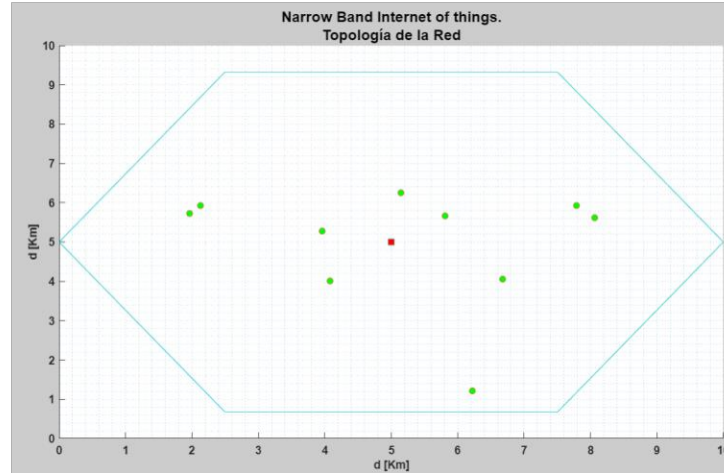


Figura 2.13. Topología de red NB-IoT y distribución de nodos.

Tabla 2.6. Parámetros considerados para la simulación. Los índices 1 y 2 se refieren a la clase de cobertura 1 y 2 respectivamente.

Categoría	Parámetros de Simulación	Símbolo	Valores
Tráfico	Número de dispositivos	$N$	Escenario 1 $N = 10$ Escenario 2 $N = 80$ Escenario 3 $N = 300$
Tráfico	Paquetes de datos [bytes] por día.	$S$	$S = 2, 12, 36, 48$
Tráfico	Longitudes de paquetes de enlace UL y DL	$l_a, m_a$	$l_a = 500$ bits $m_a = 5$ Kbit
Tráfico	Duración media de control y señalización RA	$u, \tau$	$u = 2$ ms, $\tau = 10$ ms
Tráfico	Tasa de llegada de datos de control BS-iniciada.	$\lambda_{bs}$	$\frac{1}{CF}$
Tráfico	Fracción del dispositivo que pertenece a cada clase de cobertura	$f_1, f_2$	$f_1 = 0.5, f_2 = 0.5$
Tráfico	Probabilidad de solicitud de UL	$p_u$ (resp. $1 - p$ )	$p_u = 0.8$ resp. $0.2$
Cobertura	Protocolo MAC	OFDMA SC – FDMA	
Cobertura	Número de retransmisión	$c_1, c_2$	$c_1 = 1, c_2 = 2$
Cobertura	Tasa de datos en UL	$UL_1, UL_2$	$UL_1 = 5$ Kbps, $UL_2 = 10$ Kbps, $UL_1 = 15$ Kbps, $UL_1 = 20$ Kbps
Cobertura	Tasa de datos en DL	$DL_1, DL_2$	$DL_1 = 5$ Kbps $DL_2 = 10$ Kbps, $DL_1 = 12$ Kbps $DL_2 = 15$ Kbps
Cobertura	Tiempo de retraso de sincronización	$D_{sy1}, D_{sy2}$	$D_{sy1} = 0.33$ s $D_{sy2} = 0.66$ s

Categoría	Parámetros de Simulación	Símbolo	Valores
Cobertura	Radio de cobertura macro celda NB-IoT	$r_c$	$r_c = 5 \text{ km}$
Cobertura	Frecuencia de operación para NB-IoT	$f_c$	$f_c = 850 \text{ MHz}$
Cobertura	Ancho de banda NB-IoT	$B$	$B = 180 \text{ kHz}$
Cobertura	Modelo de pérdida de trayectoria basado en el Okumura-Hata Macro celdas.	$LidB \text{ Urbano}$ $LidBSub \text{ Suburbano}$ $LidBRural \text{ Rural}$	Sección 2.2.4
Cobertura	Altura de la antena Transmisora	$ht$	$ht = 30 \text{ m}$
Cobertura	Altura de la antena móvil.	$hm$	$hm = 3$
Cobertura	Distancia entre en nodo y la estación base.	$d_{nBs}$	Parámetro calculado en km
Cobertura	Potencia de transmisión	$PTx$	$PTx = 23 \text{ dBm}$
RRM (Radio Resource Management)	Longitud de la trama de comunicación	$CF$	$CF = 10 \text{ ms}$
RRM (Radio Resource Management)	Fracción de cada trama ocupada por las señales de referencia.	$b$	$b = 0.2$
RRM (Radio Resource Management)	Tiempo de espera para obtener el mensaje RAR	$T_{th}$	$T_{th} = 2 \text{ s}$
RRM (Radio Resource Management)	Número de recursos RA	$M_1, M_2$	$M_1 = 16,$ $M_2 = 16$
RRM (Radio Resource Management)	Intervalo de tiempo entre dos scheduling de NPRACH	$t$	
RRM (Radio Resource Management)	Intervalo de tiempo entre dos scheduling de NPCCCH	$d$	
Dispositivo	Energía Inicial para un nodo	$E_0$	$E_0 = 1 \text{ KJohues}$
Dispositivo	Consumo de energía en del dispositivo en transmisión, idle y listening.	$P_t, P_l, P_L$	$P_t = 0.2 \text{ W}$ $P_l = 0.01 \text{ W}$ $P_L = 0.1 \text{ W}$
Dispositivo	Consumo de energía del dispositivo en circuitos electrónicos	$P_c$	$P_c = 0.01 \text{ W}$

### 2.3.2 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS NB-IOT CON MATLAB

Para la simulación de los 3 escenarios definidos en la sección 2.1.1, se asume una celda NB-IoT con una estación base ubicada en su centro, y nodos distribuidos aleatoriamente, con un área de  $65 \text{ km}^2$ . En cada interfaz se presenta resultados de vida útil de dispositivos IoT basados en el consumo de energía de la transmisión de datos, latencia definiendo clases de cobertura (extrema, normal) permitiendo que los dispositivos experimentan valores extremos de pérdida de ruta aprovechando las repeticiones de las señales transmitida

En la Tabla 2.7, proporciona la información detallada sobre la estructura del programa basada en Matlab, donde se indican las diferentes interfaces gráficas.

Tabla 2.7. Interfaces de simulación de dispositivo en (NB-IoT) basado en MATLAB.

Nombre	Rol principal	Explicación
<b>Simulador_NB-IoT.mlapp</b>	Interfaz	Presenta los distintos escenarios para la ejecución de programa
<b>NB-IoT_PRIMER_ESCENARIO.mlapp</b>	Interfaz	Con N=10 ejecuta la simulación, muestra la topología de la red y los resultados del consumo de batería en los dispositivos, pérdida de ruta.
<b>NB-IoT_SEGUNDO_ESCENARIO.mlapp</b>	Interfaz	Con N=80 ejecuta la simulación, muestra la topología de la red y los resultados del consumo de batería en los dispositivos, pérdida de ruta.
<b>NB-IoT_TERCER_ESCENARIO.mlapp</b>	Interfaz	Con N=300 ejecuta la simulación, muestra la topología de la red y los resultados del consumo de batería en los dispositivos, pérdida de ruta.
<b>LatenciaEnergia</b>	Modelo latencia y energía.	Asume dos clases de cobertura en función de la pérdida de trayecto, por lo que genera las matrices de latencia y energía.

El diagrama de flujo de las simulaciones de los distintos escenarios NB-IoT usando MATLAB, se muestra en la Figura 2.14.

### 2.3.2.1 Interfaces utilizadas para la simulación en Matlab

#### Interfaz de Inicio

La interfaz de inicio se la denomina “Simulador\_NB-IoT”, como se indica en la Figura 2.15, donde se muestra como portada principal al correr la aplicación. Cuenta con tres ventanas las cuales permiten acceder a los diferentes escenarios de estudio. En cada una de las ventanas es posible analizar latencia, consumo de energía y pérdidas de ruta en distintos ambientes. En la Tabla 2.8 describen los componentes de la interfaz “Simulador\_NB-IoT”.

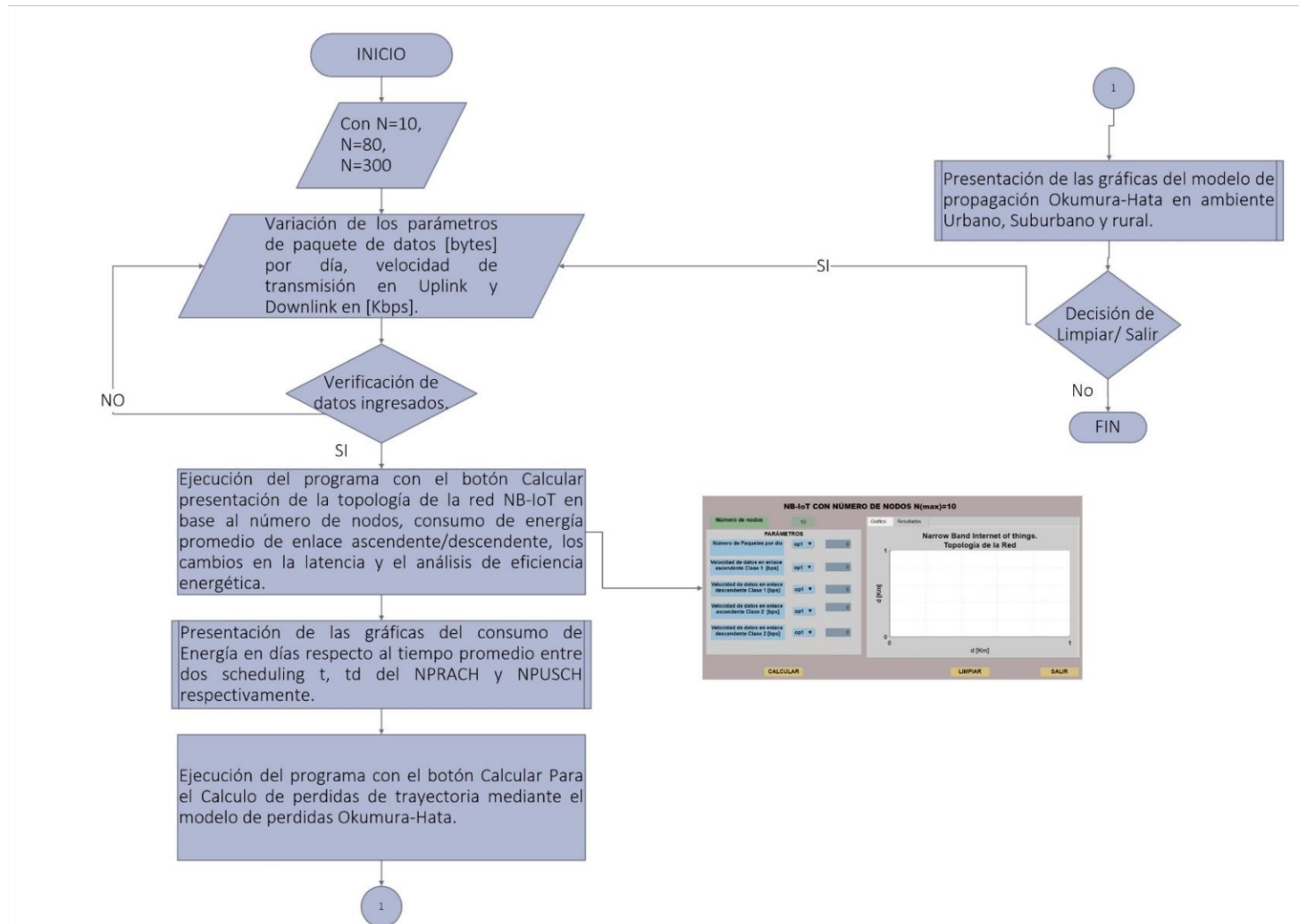


Figura 2.14. Diagrama de flujo en Matlab basado en ambientes externos.

Tabla 2.8. Interfaz Simulador\_NB-IoT








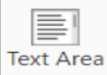
Elemento	Ícono	Utilización
app.label		Para indicar el texto de la app
app. PRIMERESCENARIOButton		Para el ingreso a la interfaz del escenario 1
app. SEGUNDOESCENARIOButton		Para el ingreso a la interfaz del escenario 2.
app. TERCERESCENARIOButton		Para el ingreso a la interfaz del escenario 3.
app.SALIRButton		Para salir de la interfaz.
app.imgNB-IoT		Para indicar el logo de la tecnología NB-IoT.
app.imgNBIOT		Para indicar el logo de la universidad
app. REALIZADOPORTextArea app. DIRIGIDOPORTextArea		Indica el nombre de la estudiante que realizó y la persona que dirige el proyecto de integración curricular.



Figura 2.15. Interfaz Simulador\_NB-IoT

### Interfaz para los 3 escenarios de simulación

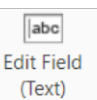
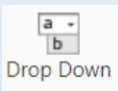




Dependiendo de la cantidad predefinida de nodos, se establecen las interfaces de cada escenario. Las cuales en base al icono *Drop down* se despliegan diferentes opciones, permitiendo cambiar los parámetros del paquete enviados por día y la velocidad de datos

promedio (bps) del enlace ascendente y descendente. Estos parámetros son requeridos para su funcionamiento; Además cada interfaz muestra la topología de la red NB-IoT.

Los resultados que se logra obtener permiten el análisis de la latencia del servicio, la duración de la batería además muestra una tabla en la interfaz de inicio que muestran valores de pérdida de propagación en ambiente externo (urbano, suburbano, rural) basados al modelo de propagación de Okumura-Hata.

Además, los iconos utilizados para elaborar la interfaz de acuerdo con el escenario propuesto se describen en la siguiente Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Iconos utilizados para los diferentes escenarios planteados

Elemento	Icono	Utilización
app.Nodos		Indica el número de dispositivos utilizados para la ejecución del programa. N=10, N=80, N=300 para cada escenario respectivamente.
app.NPD		Para escoger el número de paquetes por día.
app.VUP		Para escoger la velocidad del enlace ascendente de la clase 1.
app.VDL		Para escoger la velocidad del enlace descendente de la clase 1.
app.VUP2		Para escoger la velocidad del enlace ascendente de la clase 2.
app.VDL2		Para escoger la velocidad del enlace descendente de la clase 2.
app.UITable		Muestra una tabla de valores de pérdida ruta en diferente ambiente basado en la distancia de cada nodo.
app.Celdas		Se utiliza para mostrar la topología de la red NB-IoT.
app.SALIR		Se utiliza el botón para salir del programa.
app.LIMPIAR		Se utiliza para limpiar los valores ingresados.

▪ **Escenario 1: Ambiente Externo con N=10.**

La interfaz para el escenario 1 se muestra en la Figura 2.16 y tiene por título “NBloT\_PRIMER\_ESCENARIO”.



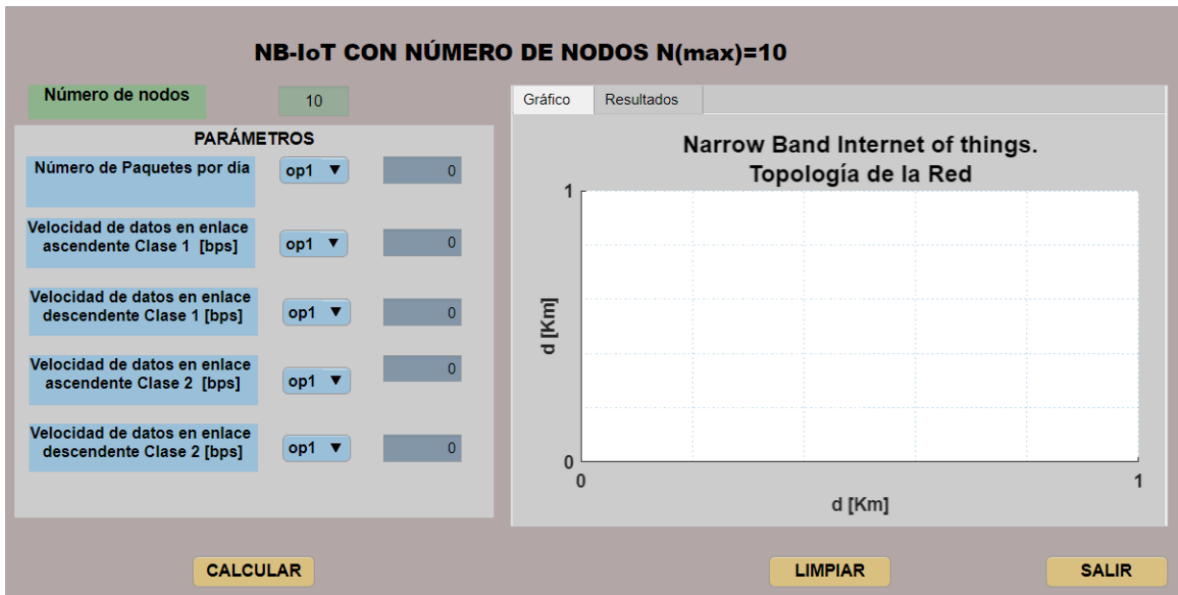


Figura 2.16. Interfaz “NBloT\_PRIMER\_ESCENARIO”.

- **Interfaz del Escenario 2: Ambiente Externo con N=80.**

Del mismo modo, la interfaz para el escenario 2 se titula “NBloT\_SEGUNDO\_ESCENARIO” como se muestra la Figura 2.17.

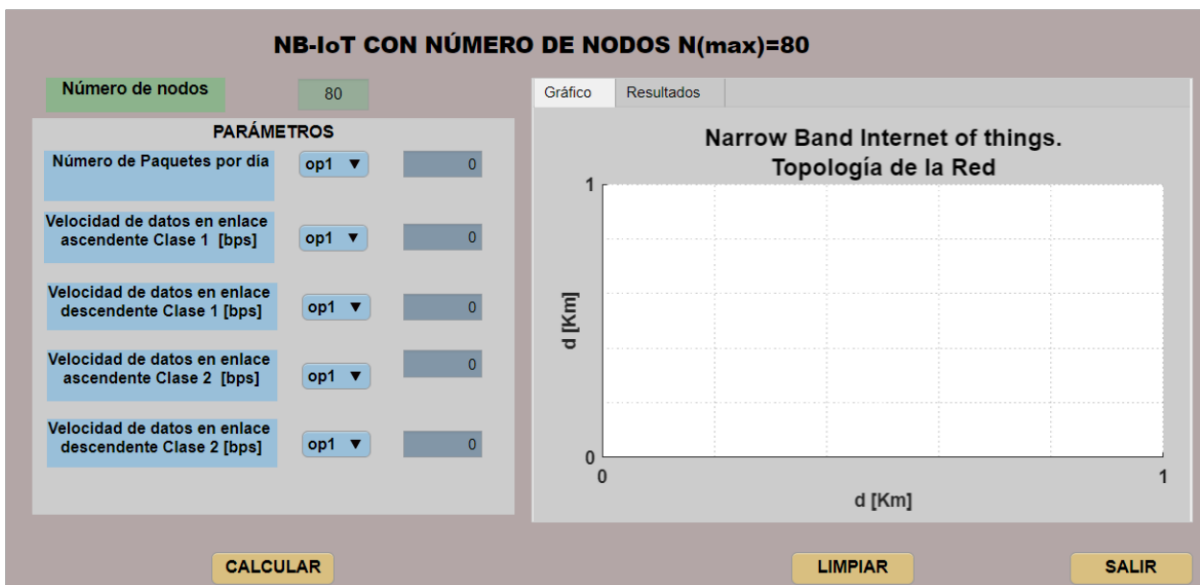


Figura 2.17. Interfaz “NBloT\_SEGUNDO\_ESCENARIO”.

- **Interfaz del Escenario 2: Ambiente Externo con N=300.**

En la Figura 2.18 se puede observar la interfaz “NBloT\_TERCER\_ESCENARIO” que permite realizar la simulación.

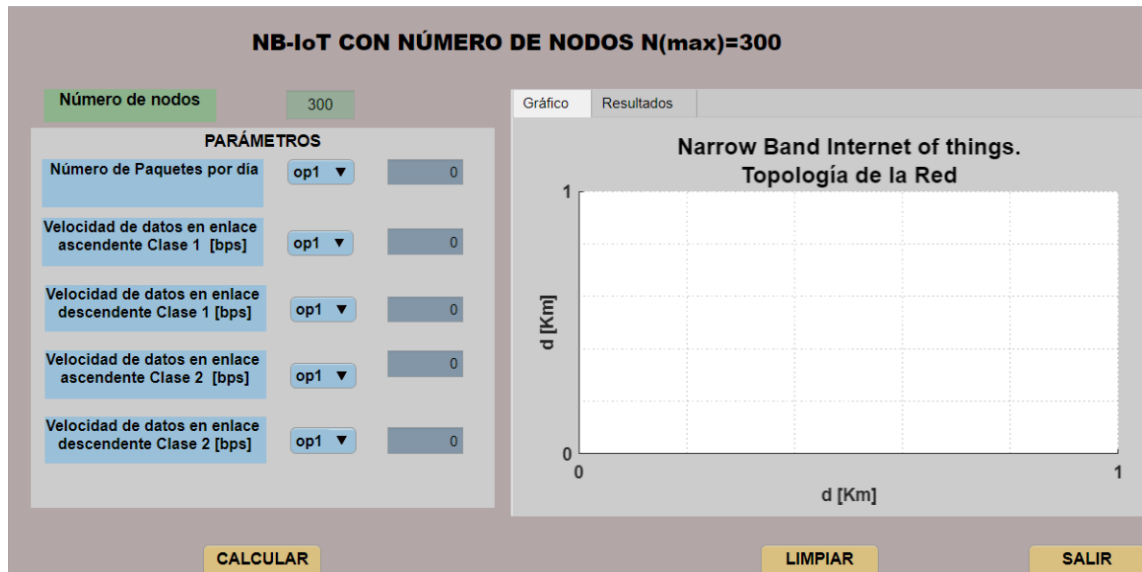


Figura 2.18. Interfaz “NBloT\_TERCER\_ESCENARIO”.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 RESULTADOS

Una vez realizadas las correspondientes simulaciones se procede a analizar los resultados obtenidos en cada escenario.

##### 3.1.1 ESCENARIO 1: AMBIENTE EXTERNO CON NÚMERO DE NODOS=10.

Como se muestra en la Figura 3.1, la interfaz denominada NB-IoT\_Primer\_Escenario, presenta 10 nodos o dispositivos. Esta simulación se analizó basándose las siguientes consideraciones:

- El número de paquetes de datos es fijo, pero varia las velocidades de datos del enlace descendente y ascendente.
- El número de paquetes de datos enviados por día es variable mientras la tasa de datos del enlace descendente y ascendente son fijas.

Además, se toma cuenta los parámetros establecidos con la Tabla 2.6.

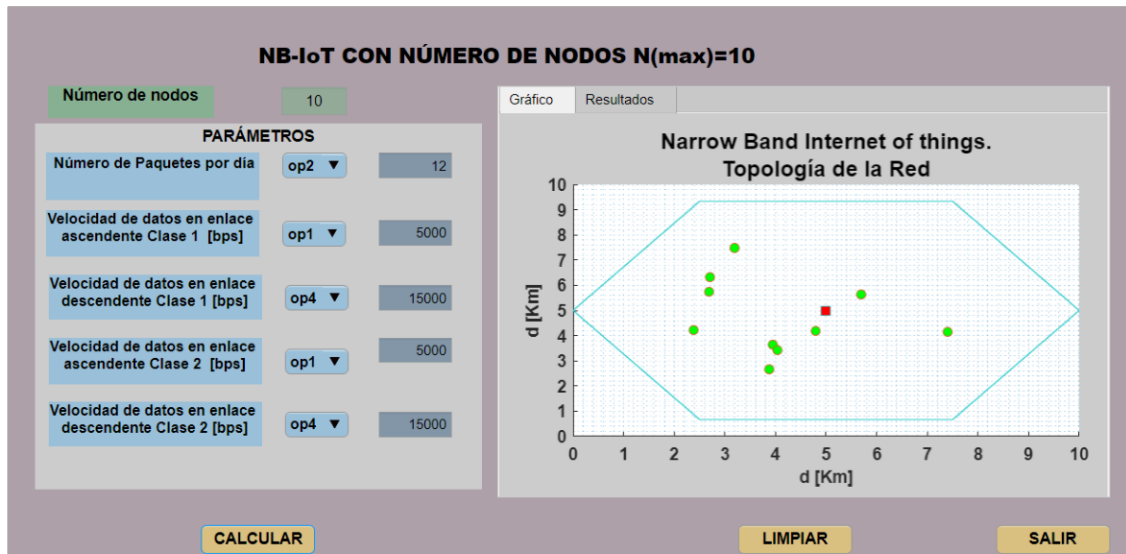


Figura 3.1. Interfaz NB-IoT con N=10

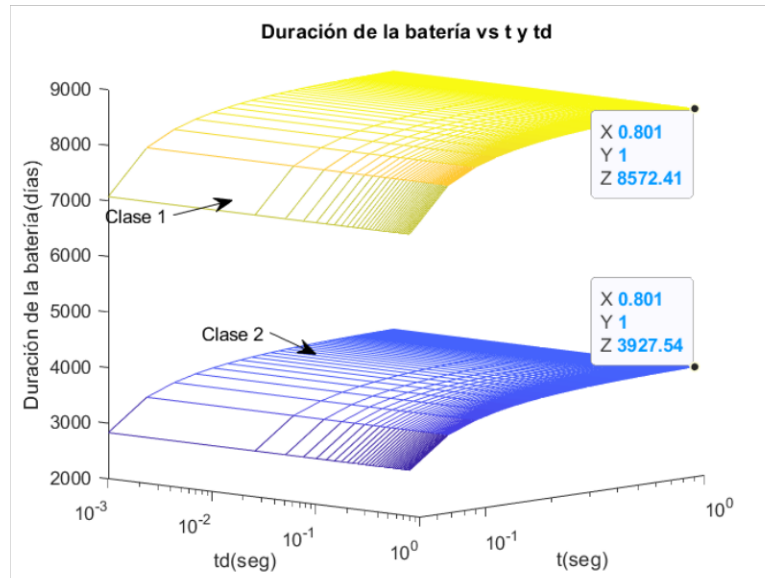
Los parámetros configurados para analizar este escenario se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros para el análisis usando NB-IoT.

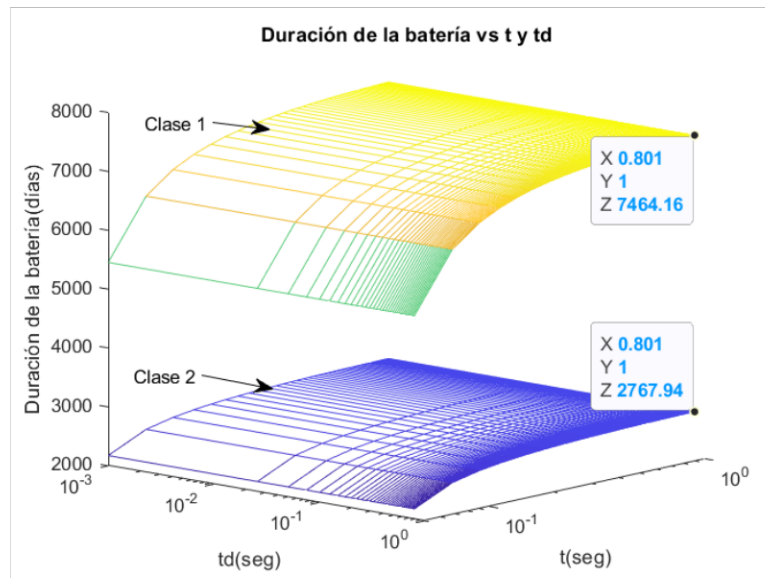
Parámetros	Unidades
Número de nodos N	10
Paquete de datos [bytes]	2,12,36 y 48
Velocidad de transmisión del enlace UL en la clase 1 [kbps]	$UL_1 = 5 Kbps, UL_1 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_1 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace UL en la clase 2 [kbps]	$UL_2 = 5 Kbps, UL_2 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_2 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace DL en la clase 1 [kbps]	$DL_1 = 5 Kbps, DL_1 = 10 Kbps, DL_1 = 12 Kbps, DL_2 = 15 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace DL en la clase 2 [kbps]	$DL_2 = 5 Kbps, DL_2 = 10 Kbps, DL_2 = 12 Kbps, DL_2 = 15 Kbps$

La Figura 3.2 (a) y (b) muestra la duración de la batería en función de  $t$  y  $d$  (scheduling de NPRACH y NPDCCH respectivamente) para diferentes velocidades de datos, tanto en los enlaces descendentes como ascendentes, para el mismo escenario. Se observa que al aumentar los valores de  $t$  y  $d$  al comienzo presenta un aumento de duración de batería en dispositivos de en ambas clases, ya que proporcionan más recursos para el scheduling tanto para NPUSCH y NPDSCH, y disminuye el tiempo dedicado a la trasmisión o recepción de datos respectivamente. Sin embargo, debido al aumento del tiempo esperados en la reserva de recursos, se reduce el tiempo de vida.

Se observa por ejemplo para la Figura 3.2 (a), que la vida útil máxima para la clase 1, considerando los parámetros de la Tabla 2.6 se tiene  $t_d = 0.801$ ,  $t = 1$  con 8572.41 días; mientras la vida útil máxima para la clase 1 en Figura 3.2 (b) es  $t_d = 0,801$ ,  $t = 1$  con 7464.16 días.



a. Duración de la batería con  $t$  vs  $d$ , paquete de datos=2, C1: UL=10kbps, DL=12kps y C2: UL=5kbps, DL=15kps.



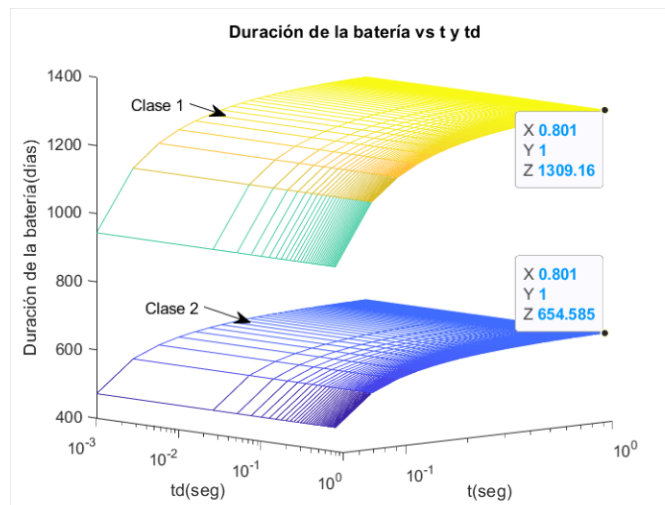
b. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=2, C1: UL=5kbps, DL=12kps y C2: UL=5kbps, DL=5kps

Figura 3.2. (a) y (b) Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos fijo y variación de velocidad de transmisión del enlace ascendente /descendente con  $N=10$ .

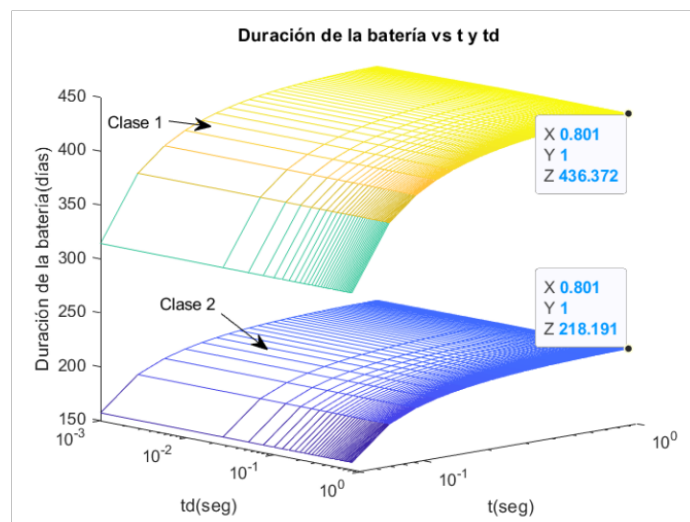
Para la Figura 3.3 se muestra cómo la variación de los diferentes paquetes reduce la vida útil de la batería; sin embargo, si se reduce la cantidad de paquetes, a más de prolongar la

vida útil de la batería, también puede reducir la latencia y mejorar la confiabilidad; es decir, al comprimir los paquetes y reducir el tiempo esperado en la reserva de recursos puede prologar con éxito la duración de la batería de los dispositivos, especialmente si la UE actúa como un nodo.

Para la Figura 3.3(a), la vida útil máxima para la clase 1 considerando los parámetros de la Tabla 2.6 y Tabla 3.1 se tienen los siguiente valores:  $t_d = 0.801$ ,  $t = 1$  con 1309.16 días, mientras la vida útil máxima para la Figura 3.3 (b) clase 1 es  $t_d = 0.801$ ,  $t = 1$  con 436.37 días.



a. . Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=12, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps y DL=15kpbs



b. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=36, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps, DL=15kpbs.

Figura 3.3. (a) y (b) Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos variable y velocidad de transmisión del enlace ascendente/ descendente/ fijo con  $N=10$ .

La Figura 3.4 muestra la interacción de dos clases de cobertura coexistentes (clase 1 y clase 2) en una celda. El eje 'y' representa la vida útil de la batería para ambas clases, mientras que el eje 'x' representa el número retransmisiones ( $c_2$ ) para la clase 2. Al aumentar  $c_2$ , la cantidad de recursos que se utilizan en la retransmisión de dispositivos de clase 2 también aumenta. Esto da como resultado un incremento de la latencia, tanto para dispositivos de clase 1 y 2, lo que a su vez aumenta el consumo de energía y reduce la vida útil de la batería.

Se puede observar, por ejemplo, que al aumentar el número de retransmisiones de 11 a 13, se reduce la duración promedio de la batería de los nodos de clase 1, cuando  $f_1 = 0.95$  de  $y = 1142.02$  días a  $1090.67$  días.

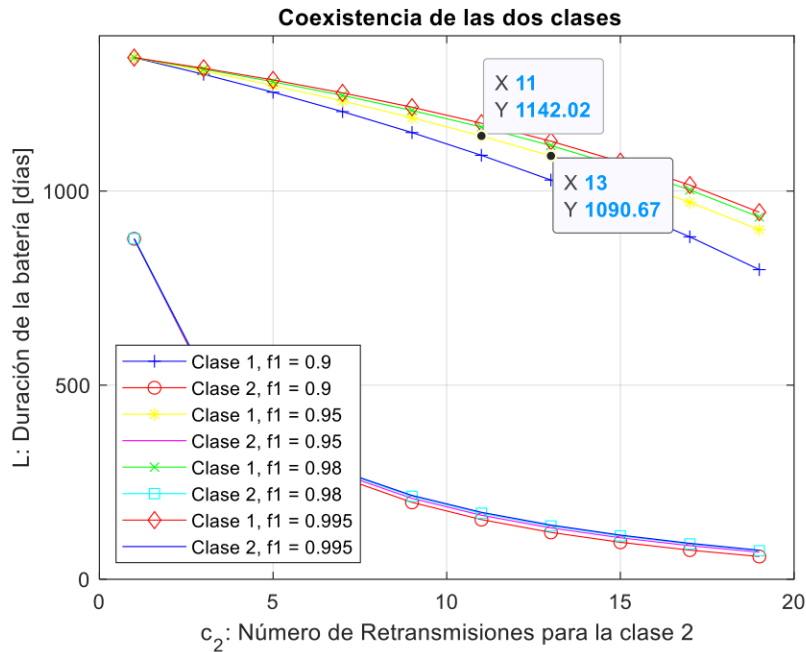


Figura 3.4. Duración de la batería vs el número de repeticiones para la clase 2 ( $\tau = 2ms$ ,  $d = 10ms$ ,  $t = 65 ms$ , C1: paquete de datos=12, UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps y DL=15kps).

La gráfica de pérdidas obtenidas en diferentes ambientes en función de la distancia se muestra en la Figura 3.5. En donde se puede observar que el ambiente urbano presentó pérdidas de propagación de  $156.56$  [dB] convirtiéndose en el entorno con mayores pérdidas en el escenario actual; mientras los valores que presentan menores pérdidas son los entornos suburbanos y rurales debido al menor número de obstáculos que presente.

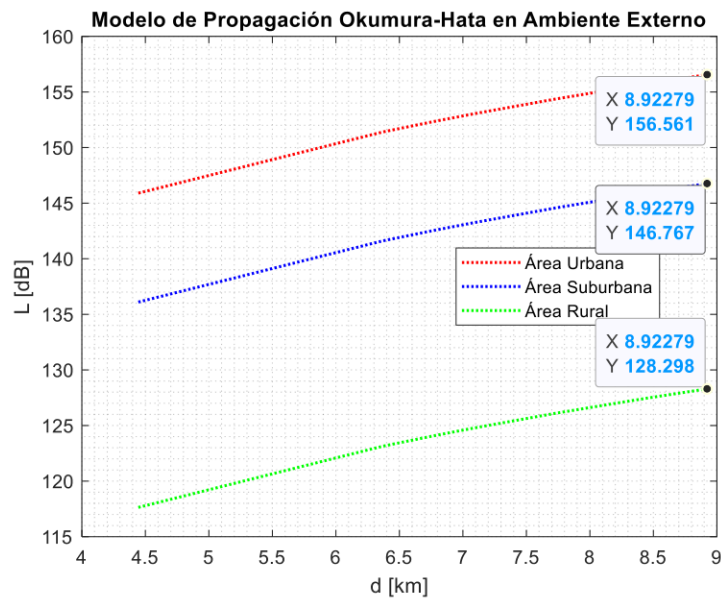


Figura 3.5. Pérdidas en el Escenario 1 para diferentes ambientes

### 3.1.2 ESCENARIO 2: AMBIENTE EXTERNO CON NÚMERO DE NODOS=80.

La interfaz NB-IoT\_Segundo\_Escenario presenta 80 nodos o dispositivos (Figura 3.6). Para analizar este escenario se cumple con los mismos requisitos planteados para el Escenario 1, es decir, se considera, por un lado, el número de paquetes de datos fijos, mientras las velocidades de datos de UL y DL se varían, y, por otro lado, se analiza los resultados donde el número de paquetes de datos enviados sean variables y la tasa de datos del UL y DL sean fijas. Además, se toma cuenta los parámetros establecidos con la Tabla 2.6.

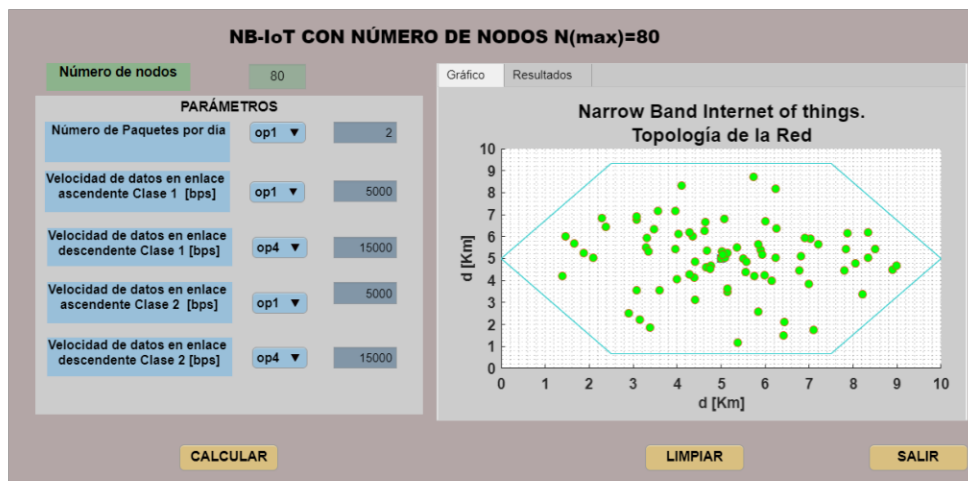


Figura 3.6. Interfaz NB-IoT con N=80

Los parámetros utilizados para analizar este escenario se enumeran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros considerados para el análisis usando NB-IoT en ambiente externo

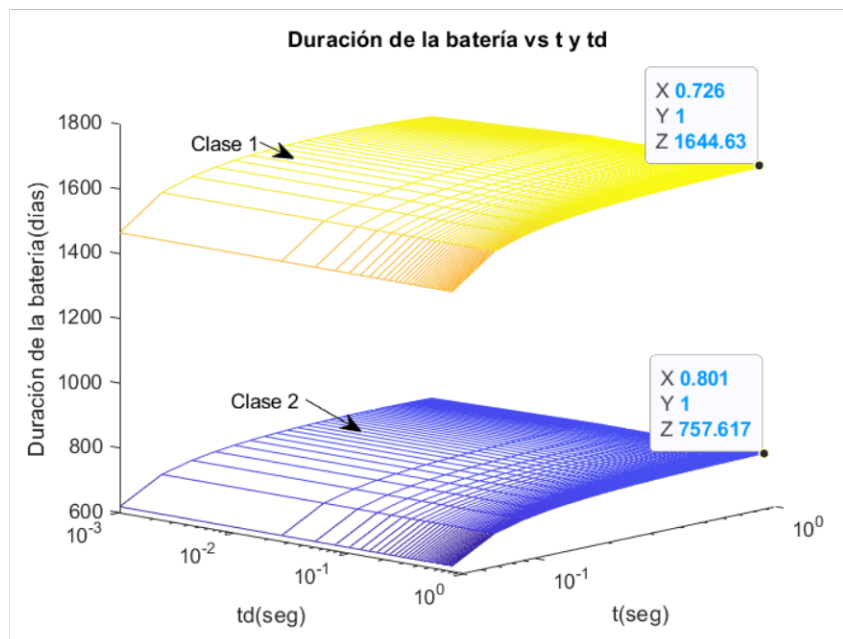
Parámetros	Unidades
Número de nodos N	80
Paquete de datos [bytes]	2,12,36,48
Velocidad de transmisión de UL en la clase 1 [kbps]	$UL_1 = 5 Kbps, UL_1 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_1 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión de UL en la clase 2 [kbps]	$UL_2 = 5 Kbps, UL_2 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_2 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión de DL en la clase 1 [kbps]	$DL_1 = 5 Kbps, DL_1 = 10 Kbps, DL_1 = 12 Kbps, DL_1 = 15 Kbps$
Velocidad de transmisión de DL en la clase 2 [kbps]	$DL_2 = 5 Kbps, DL_2 = 10 Kbps, DL_2 = 12 Kbps, DL_2 = 15 Kbps$

Los resultados obtenidos para el escenario 2 como se muestra en la Figura 3.7(a) se tiene:

Para la clase 1  $t_d = 0.726$  y  $t = 1$ , con una duración de días de 1644.63 y,

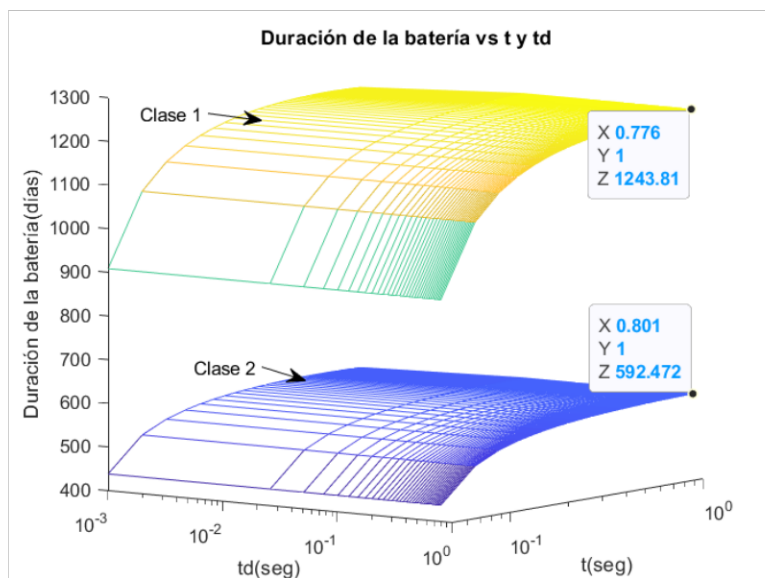
Para la clase 2  $t_d = 0.801$  y  $t = 1$ , con una duración de 757.62 días.

Por tanto, aumentar el tiempo esperado en los recursos la duración de la batería de los dispositivos en ambas clases disminuye considerando la variación de las tasas de datos en enlace descendente, ascendente y el número de paquetes de datos fijo.



a. Duración de la batería con  $t$  vs  $d$ , paquete de datos=12, C1: UL=20kbps, DL=15kps y C2: UL=10kbps, DL=15kps.

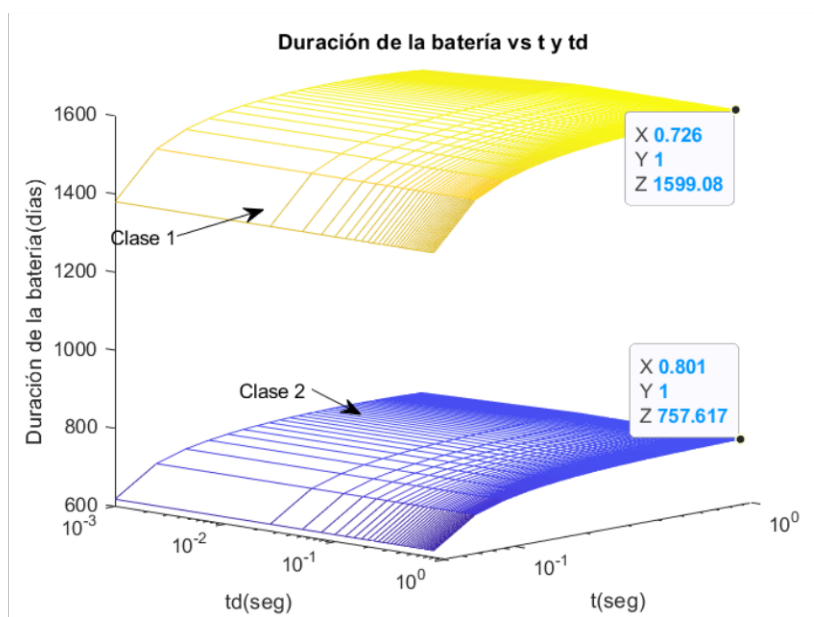




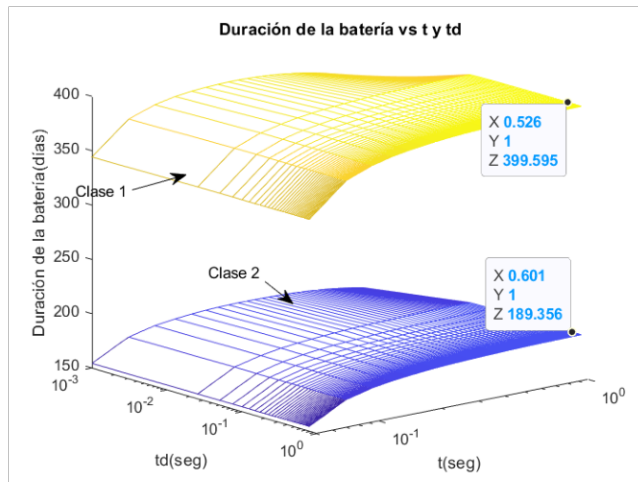
b. Duración de la batería con  $t$  vs  $d$ , paquete de datos=12, C1: UL=5kbps, DL=12kps y C2: UL=5kbps, DL=10kps.

Figura 3.7. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos fijo y variación de velocidad de transmisión del enlace ascendente /descendente.

Utilizando la variación de paquetes y la velocidad de transmisión en cada enlace de manera constante muestra cómo puede acortar la duración de la batería en los dispositivos. Según la Figura 3.8, en (a) para la clase 1, se tiene  $t_d = 0.726$ ,  $t = 1$  con 1599.08 días; mientras para en (b) para la clase 1,  $t_d = 0.526$ ,  $t = 1$  con 399.59 días, de lo que se puede concluir que al aumentar la cantidad de paquetes enviados reduce la vida útil de la batería.



a. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=12, C1: UL=15kbps, DL=15kps y C2: UL=10kps, DL=15kbps.



a. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=48, C1: UL=15kbps, DL=15kps y C2: UL=10kps, DL=15kbps.

Figura 3.8. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos variable y velocidad de transmisión del enlace ascendente/ descendente fijo con  $N=80$ .

La Figura 3.9 muestra el impacto mutuo de dos clases de cobertura coexistentes en una celda, es decir, clase 1 y clase 2. El aumento el número de transmisiones  $c_2$  aumenta la cantidad de recursos, dando como resultado un aumento de la latencia tanto para dispositivos de clase 1 como de clase 2 y, por lo tanto, aumenta el consumo de energía y reduce la vida útil de la batería. Además, se puede ver que un aumento en la fracción de nodos que pertenecen a la clase 2 afecta negativamente el rendimiento de la batería para los dispositivos de clase 1. Por ejemplo, aumentar nodos 9 repeticiones a 11 repeticiones de  $c=2$  se reduce la duración promedio de la batería de los nodos de clase 1 cuando  $f_1 = 0.90$  de 1536.37 días a 1478.58 días.

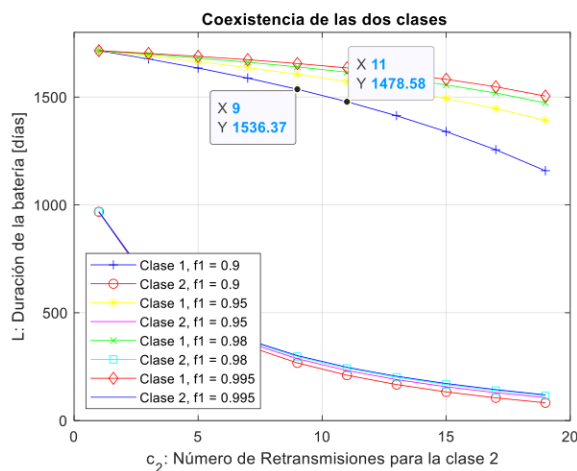


Figura 3.9. Duración de la batería de los dispositivos vs el número de repeticiones ( $\tau = 2ms$ ,  $d=10ms$ ,  $t=65ms$ , C1: paquete de datos=12, UL=20kbps, DL=15kps y C2: UL=10kps y DL=15kbps).

La Figura 3.10 representa el comportamiento de NB-IoT en ubicaciones externas. Las pérdidas obtenidas en la zona urbana con 159.65dB con un rango de cobertura de 10.92 km, presentando así la mayor cantidad de pérdidas de propagación. Mientras las pérdidas de la zona suburbana y rural son 149.86dB y 131.39dB respectivamente.

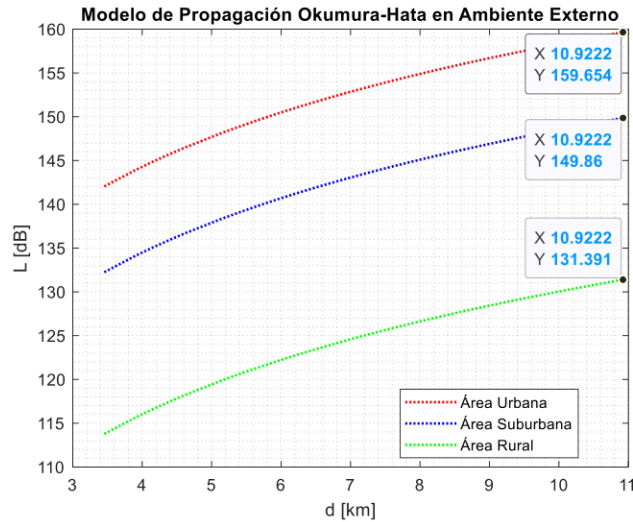


Figura 3.10. Pérdidas en el Escenario 2 para diferentes ambientes.

### 3.1.3 ESCENARIO 3: AMBIENTE EXTERNO CON NÚMERO DE NODOS=300

En este escenario la cantidad de nodos o dispositivos presentes son 300 y la interfaz gráfica para este escenario se llama NB-IoT\_Tercer\_Escenario, como muestra la Figura 3.11. Para el análisis se consideran los mismos aspectos planteados acerca de la variación de parámetros detallados en la sección 3.1.1 Con el fin de analizar el impacto del scheduling de los canales de datos y control, así como la coexistencia de clases de cobertura, en la latencia experimentada y la duración de la batería de los dispositivos IoT.

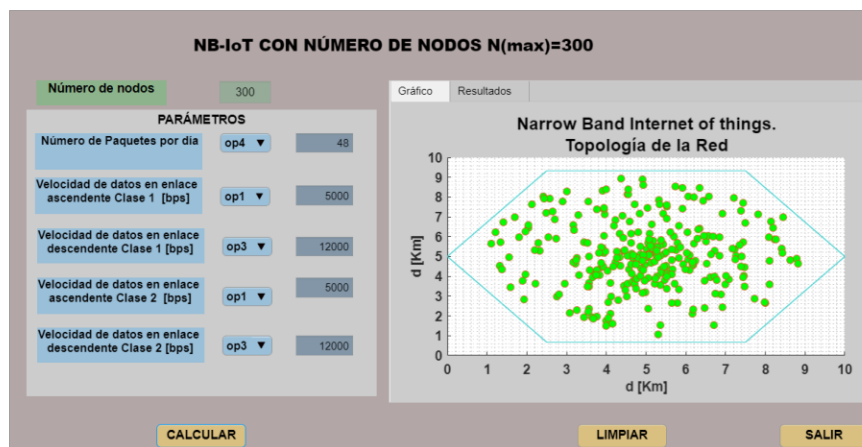


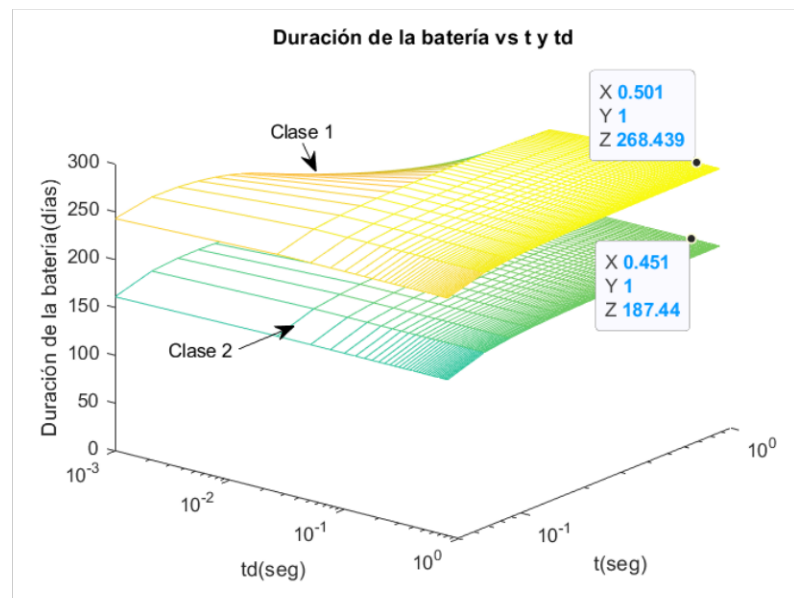
Figura 3.11. Interfaz NB-IoT con N=300.

Para analizar el escenario se considera los parámetros establecidos en la Tabla 3.3.

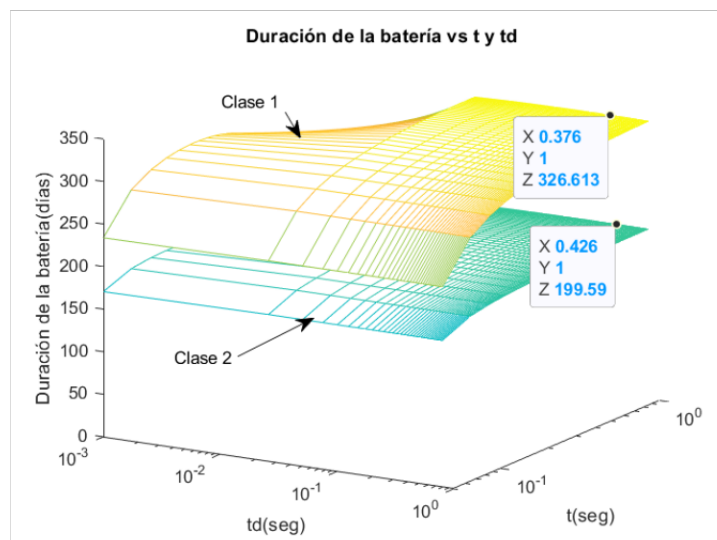
Tabla 3.3. Parámetros considerados para el análisis usando NB-IoT en ambiente externo

Parámetros	Unidades
Numero de nodos N	300
Paquete de datos [bytes]	12,12,36,48
Velocidad de transmisión del enlace ascendente en la clase 1 [kbps]	$UL_1 = 5 Kbps, UL_1 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_1 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace ascendente en la clase 2 [kbps]	$UL_2 = 5 Kbps, UL_2 = 10 Kbps, UL_2 = 15Kps, UL_2 = 20 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace descendente en la clase 1 [kbps]	$DL_1 = 5 Kbps, DL_1 = 10 Kbps, DL_1 = 12 Kbps_1, DL_1 = 15 Kbps$
Velocidad de transmisión del enlace descendente en la clase 2 [kbps]	$DL_2 = 5 Kbps, DL_2 = 10 Kbps, DL_2 = 12 Kbps, DL_2 = 15 Kbps$

Usando los parámetros previamente mencionados, se encontró que la latencia experimentada y la energía consumida en diferentes canales físicos como indica la Figura 3.12 (a), expresan el tiempo máximo de duración de la batería de acuerdo con la clase 1 con  $t_d = 0.501$  y  $t = 1$  con 268.44 días, mientras que la vida útil máxima para la clase 2 el  $t_d = 0.451$  y  $t = 1$  con 187.44 días, obteniendo como resultado una disminución de vida útil para la batería.



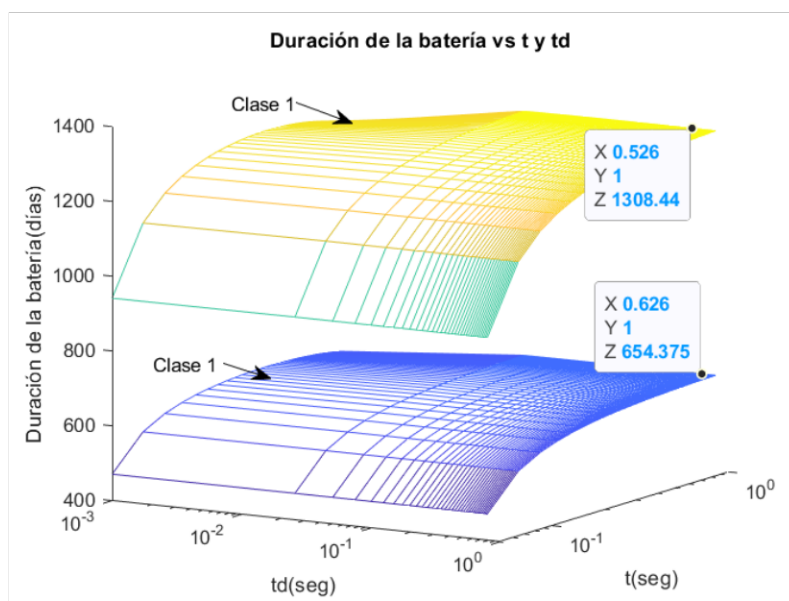
a. Duración de la batería con  $t$  vs  $d$ , paquete de datos=48, C1: UL=20kbps, DL=5kps y C2: UL=15kbps, DL=12kps.



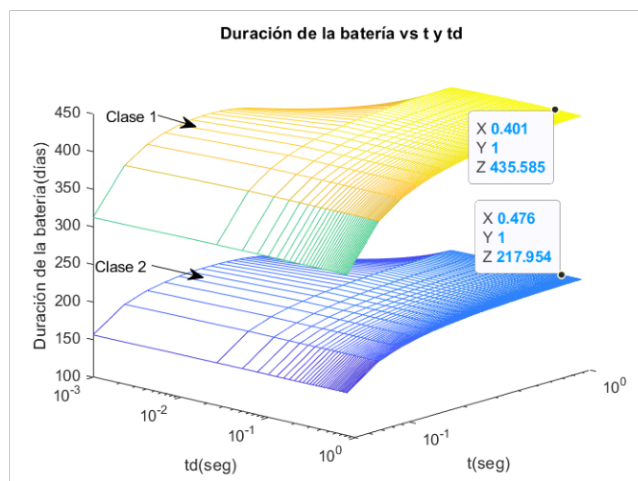
b. Duración de la batería con  $t$  vs  $d$ , paquete de datos=48, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=15kbps, DL=15kps.

Figura 3.12. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos fija y velocidad de transmisión del enlace ascendente /descendente variable con  $N=300$ .

Se observa que al implementar más paquetes a la red NB-IoT reduce la vida útil de la batería de la batería, así como se muestra en Figura 3.13 (a) y(b). La duración máxima para la clase 1 es:  $td = 0.526$ ,  $t = 1.00$  con 1308.44 días; mientras para la clase 2 se tiene  $td = 0.626$ ,  $t = 1.00$  con 654.375 días. Al implementar más paquetes se tiene para la clase 1  $td = 0.401$  a,  $t = 1$  con 435.59 días y para la clase 2 es:  $td = 0.476$  and  $t = 1$  con 217.54 días.



a. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=12, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps, DL=15kbps.



b. Duración de la batería vs  $t$  y  $d$ , paquete de datos=36, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps, DL=15kbps.

Figura 3.13. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos variable y velocidad de transmisión del enlace UL/ DL fija con  $N=300$ .

La Figura 3.14 muestra el impacto mutuo de dos clases de cobertura coexistentes en una celda, es decir, clase 1 y clase 2. El aumento del número de transmisiones  $c_2$ , aumenta la cantidad de recursos, dando como resultado un aumento de la latencia tanto para dispositivos de clase 1 como de clase 2 y, por lo tanto, aumenta el consumo de energía y reduce la duración de la batería. Además, se puede ver que un aumento en la fracción de nodos que pertenecen a la clase 2 afecta negativamente el rendimiento de la vida útil de la batería para los dispositivos de clase 1. Por ejemplo, aumentar  $c_2$  de 13 a 15 reduce la duración promedio de la batería de los nodos de clase 1 cuando  $f_1 = 0.995$  de 1128.02 días a 1075.32 días.

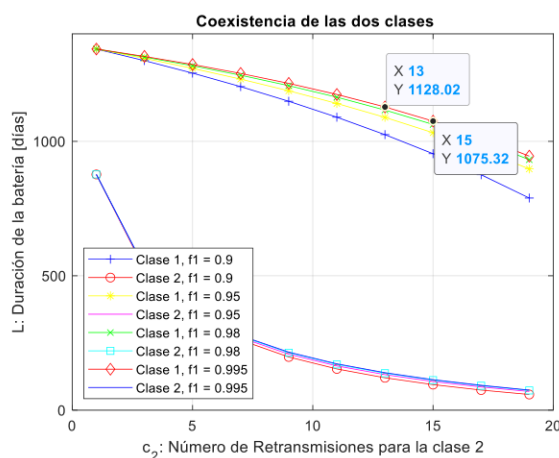


Figura 3.14. Duración de la batería de los dispositivos vs el número de repeticiones ( $\tau = 2ms$ ,  $d=10ms$ ,  $t=65ms$ , C1: paquete de datos=12, UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps y DL=15kbps).

Finalmente, en la Figura 3.15 se muestra cómo se comporta la tecnología NB-IoT en zonas externas. En el ambiente urbano se observa las mayores pérdidas con un valor de 159.85dB a una cobertura de 11.06km. Mientras que, en las áreas suburbanas y rurales, las pérdidas serían de 150.05dB y 131.59dB respectivamente.

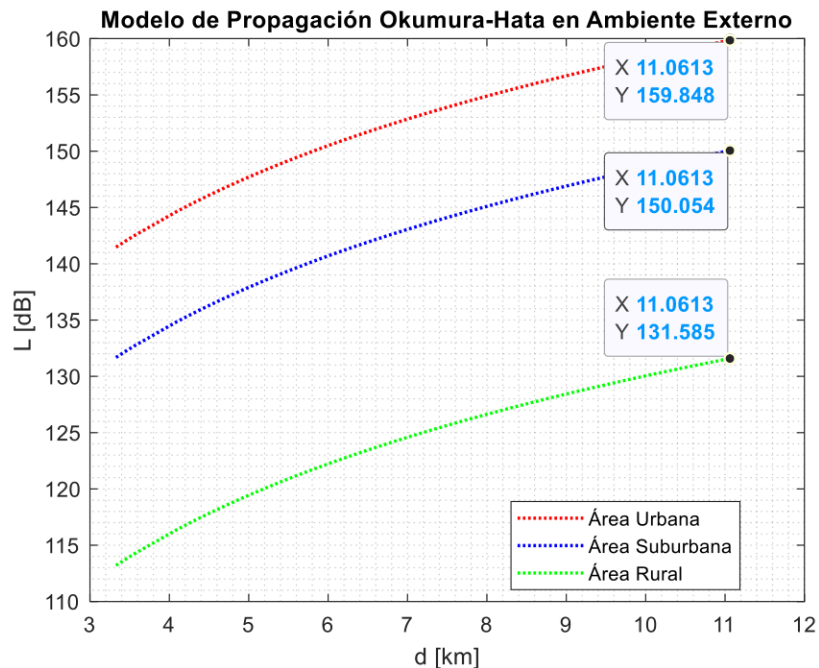


Figura 3.15. Pérdidas en el Escenario 3 para diferentes ambientes.

### 3.2 CONCLUSIONES

Después de estudiar la tecnología NB-IoT en el capítulo 1, utilizando la infraestructura de red LTE existente, se concluye que la tecnología proporciona características técnicas eficiente las cuales son capaces de responder nuevos requisitos que imponen los dispositivos IoT, permitiendo así desarrollar diversas aplicaciones con bajo consumo de potencia.

Al evaluar el consumo de energía en los tres diferentes escenarios presentados en Matlab, los resultados mostrados en base a la variación de los paquetes de datos enviados al día, se evidencia que reduciendo el número de paquetes; además de minimizar la latencia y mejorar la confiabilidad, también prolonga la vida útil de la batería. Dicho esto, el consumo de energía y la compresión de datos es muy importante, especialmente cuando el UE actúa como un nodo, lo que ayuda a ampliar la cobertura de la BS de IoT a los usuarios

En base la coexistencia de clases en una celda, aumentar el número de retransmisiones para los scheduling en los canales NPUSCH y NPDSCH conducirá a un aumento en la

cantidad de recursos de la red y, por lo tanto, aumentará el consumo de batería y esto a su vez reducirá el tiempo de vida útil en los dispositivos.

Al aumentar el número de nodos en la red NB-IoT de  $N = 80$  a  $N = 300$ , el tráfico entrante se puede analizar mediante la implementación de un modelo de colas. A través de las expresiones matemáticas indicadas en la sección 2.2.2 se puede optimizar los scheduling de los canales de datos en los enlaces Downlink y Uplink, minimizando la latencia y maximizando la vida útil de la batería en los dispositivos.

El no disponer de una infraestructura NB-IoT implementada en el Ecuador, limita la realización de pruebas de esta tecnología en ambientes reales, siendo esto también un limitante para implementar soluciones IoT con un masivo número de dispositivos.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

En base al consumo de batería en los dispositivos NB-IoT se recomienda reducir el número de paquetes de datos en la transmisión y recepción lo que permite fácilmente prolongar la duración de la batería

NB-IoT se considera una tecnología de comunicaciones inalámbricas prometedora para la implementación de sistemas Internet de las cosas (IoT), especialmente para el entorno exterior. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis a nivel de operadoras de telefonía móvil para que se inicie un proceso de implementación de esta tecnología a nivel del Ecuador.

Para futuros proyectos NB-IoT, es posible investigar métodos de comprensión de datos considerando el impacto de pérdida de paquetes durante la transmisión y las posibles fallas que puedan presentarse en los sistemas de comunicación obteniendo así resultados acerca del consumo de energía en los dispositivos.

Para futuros proyectos NB-IoT se pueda realizar un análisis, comparaciones y simulaciones en base al consumo de energía promedio en distintos dispositivos NB-IoT utilizando los dos esquemas para el ahorro de energía denominados PSM (*Saving Mode*) y eDRX (*Extended Discontinuous Reception*).

## **4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Y. B. Lin, H. C. Tseng, Y. W. Lin, and L. J. Chen, "NB-IoTtalk: A Service Platform for Fast Development of NB-IoT Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 928–939, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2865583.



- [2] R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [3] S. K. Routray *et al.*, "Narrowband IoT ( NBloT ) for Smart Cities," no. Icciv, pp. 0–5, 2021.
- [4] N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, and A. Ghosh, "NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, no. 1, 2016, doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794567.
- [5] A. Rachedi, M. H. Rehmani, S. Cherkaoui, and J. J. P. C. Rodrigues, "IEEE Access Special Section Editorial: The Plethora of Research in Internet of Things (IoT)," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 9575–9579, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2647499.
- [6] C. Kuhlins, B. Rathony, A. Zaidi, and M. Hogan, "Cellular networks for Massive IoT," *Ericsson White Paper*, pp. 1–16, 2019, [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-networks-for-massive-iot-enabling-low-power-wide-area-applications>
- [7] S. K. Routray and H. M. Hussein, "Narrowband IoT: An Appropriate Solution for Developing Countries," 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1903.04850>
- [8] C. I. O. View, "Global Macro Technology," pp. 1–6, 2020, [Online]. Available: <https://www.dws.com/insights/cio-view/macro/internet-of-things/>
- [9] Y. D. Beyene *et al.*, "NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud -RAN Implementation," no. June, pp. 26–32, 2017.
- [10] A. Díaz Zayas, P. Merino Gómez, and F. J. Rivas Tocado, "3GPP NB-IoT, tecnología y herramientas de medida," no. Jitel, pp. 310–317, 2017, doi: 10.4995/jitel2017.2017.6577.
- [11] GSMA, "NB-IoT Deployment guide to basic feature set requirements," *Gsma*, vol. Release 3, no. June, pp. 1–80, 2019, [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/resources/nbiot-deployment-guide-v3/>
- [12] "GSMA | Internet of Things (NB-IoT) | Internet of Things." <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-technology-nb-iot/> (accessed Dec. 13, 2021).
- [13] Kumar Sultania Ashish, Zand Pouria, Blondia Chris, and Famaey Jeroen, "Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX," pp. 1–7, 2018.
- [14] M. Bhebhe, "Performance of Narrow Band Internet of Things (NBloT) Networks," 2019.
- [15] J. J. Viscaíno Gavilanes, "Evaluación de rendimiento de las tecnologías 802.11 y LTE para proveer servicios web en redes vehiculares AD-HOC," 2018.

- [16] J. Schlien and D. Raddino, "Narrowband Internet of Things Whitepaper," p. 42, 2016, [Online]. Available: [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma266/1MA266\\_0e\\_NB\\_IoT.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf)
- [17] O. Liberg, M. Sundberg, Y.-P. E. Wang, J. Bergman, J. Sachs, and G. Wikström, "NB-IoT," in *Cellular Internet of Things*, Elsevier, 2020, pp. 273–402. Doi: 10.1016/b978-0-08-102902-2.00007-8.
- [18] R. Mendes da Cruz, M. Alberto Pereira Ricardo Co-Supervisor, and A. Filipe Pinto Coelho, "Network Planning Model for NB-IoT," 2019.
- [19] Afzal Junaid, "NB-IoT – Data Rates and Latency | NETMANIAS." <https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=blog&no=12609&xtag=iot-nb-iot&xref=nb-iot-data-rates-and-latency> (accessed Feb. 14, 2022).
- [20] M. I. Memberid, *Guía de los Fundamentos para la dirección de Porectos (GUÍA DEL PMBOK)*.
- [21] R. Luis, "Investigación experimental," pp. 1–14, 2019, [Online]. Available: <https://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/wp-content/uploads/2019/01/Investigación-experimental.pdf>
- [22] A. Azari, G. Miao, C. Stefanovic, and P. Popovski, "Latency-Energy Tradeoff based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems," Jul. 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1807.05602>
- [23] P. O. C. I. Beciez Ordonez Selene, Flores Rodriguez Nestor Javier, "Aplicación de Modelos de Propagación en Sistemas Inalambricos de Area Extendida," p. 98, 2011.
- [24] L. A. Fernandez Orquera, "Estudio y simulación del canal móvil para bandas LTE con distribución RICIAN y RAYLEIGH en el modelo de propagación Okumura Hata en base a Matlab," 2014.
- [25] "Maximum Coupling Loss (MCL) and Maximum Path Loss (MPL) - Techplayon." <https://www.techplayon.com/maximum-coupling-loss-mcl-and-maximum-path-loss-mpl/> (accessed Jan. 18, 2022).

## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Código planteado en Matlab para la elaboración de trabajo de Tripulación

# ANEXO I

Código para la elaboración del proyecto de titulación

```
%=====
%%-----  P R I M E R   E S C E N A R I O  -----%%
%=====
%%          G R A F I C A   D E   C E L D A S
%=====
N=10;          % Número de nodos o sensores
u = 0.002;     % Duración media de control: [seg]
tau = 0.01;    % Duración media de la señalización RA: [seg]
hold(app.UIFigure.CurrentAxes, 'on');
angulos=0:60:360;
for i=1:length(angulos)
if(i<=5)
L1=5*cos(angulos(i)*2*pi/360);
L2=5*cos(angulos(i+1)*2*pi/360);
L3=5*sin(angulos(i)*2*pi/360);
L4=5*sin(angulos(i+1)*2*pi/360);
L5=5*cos(angulos(6)*2*pi/360);
L6=5*cos(angulos(1)*2*pi/360);
L7=5*sin(angulos(6)*2*pi/360);
L8=5*sin(angulos(1)*2*pi/360);
line(app.Celdas,[L1,L2]+5,[L3,L4]+5, 'Color',[.18 .8 .8]);
else
line(app.Celdas,[L5,L6]+5,[L7,L8]+5, 'Color',[.18 .8 .8]);
end
end
for i=1:N
rRand=4*rand();
aRand=360*rand();
x(i)=(rRand*cos(aRand*2*pi/360))+5;
y(i)=(rRand*sin(aRand*2*pi/360))+5;
dN_BS(i)=sqrt(((abs(x(i))).^2)+((abs(y(i))).^2)); % [km]
d_nBS=sort(dN_BS);
distancia=(d_nBS. ');
end
centrx=5;
centry=5;
plot(app.Celdas,centrx,centry, 'cs', 'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerSize', 8)
plot(app.Celdas,x,y, 'o', 'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize', 6);

LatenciaEnergia(app, N, u, tau);

%=====
fc = 850;      %fc-> frecuencia en (MHZ) de 150-1500 MHZ
ht = 30;      %ht-> altura efectiva de la antena transmisora en (m) de 30-200 m
hm = 3;       %hm-> altura efectiva de la antena receptora o altura de móvil en
(m) de 1-10 m
PTx = 23 ;    %PTx  Potencia de transmisión en dBm
```

```

%=====
%=====
%%                               P A T H   L O S S
%=====

%El modelo de Okumura-Hata
% ----- Para ciudades Grandes -----
% Consideración para la ciudad de Quito f>=400
% Factor de corrección que depende de la altura del móvil Factor= a(hm)
ahm = 3.2*(log10(11.75*hm)). ^2 - 4.97;
% A. Ambiente Urbano Perdidas por trayectoria en (dB)
LidB1=69.55+26.16*log10(fc)-13.82*log10(ht)+(44.9-6.55*log10(ht))*log10(d_nBS)-
ahm;
LidB=sort(LidB1);
LidB_Urbano=(LidB. ');
% B. Ambiente Suburbano Perdidas por trayectoria en (dB)
LidBSub1=sort(LidB - 2*(log10(fc/28)).^2 - 5.4);
LidBSub=sort(LidBSub1);
LidB_Surbano=(LidBSub. ');
% C. Ambiente Rural o abierto Perdidas por trayectoria en (dB)
LidBRural1 =sort(LidB - 4.78*(log10(fc)).^2 + 18.33*log10(fc) - 40.94);
LidBRural=sort(LidBRural1);
LidB_Rural=(LidBRural. ');

rst=table(distancia,LidB_Urbano,LidB_Surbano,LidB_Rural);
app.UITable.Data=rst;
fprintf('La distancia es: d [km]=%.3f \n',d_nBS);
fprintf('La pérdida de propagación es: LidB_Urbano=%.3f \n',LidB);
fprintf('La pérdida de propagación es: LidB_Surbano=%.3f\n',LidBSub);
fprintf('La pérdida de propagación es: LidB_Rural=%.3f\n',LidBRural);
figure(3)
plot(d_nBS,LidB, 'r',d_nBS,LidBSub, 'b',d_nBS,LidBRural,
':g','LineWidth',1.5)
legend('Área Urbana ', 'Área Suburbana ', 'Área Rural ', 'location', 'best');
grid minor
xlabel('d [km]');
ylabel('L [dB]');
title('Modelo de Propagación Okumura-Hata en Ambiente Externo');

%=====
%% PARAMETROS
%=====
% -----
% Tráfico
% -----

S1=app.paq.Value;      % Número de paquete por cada hora considerando 1 paquete
por 2 horas
S = S1*1;             % Generación de paquetes [por día]
pu = 0.8;             % probabilidad de solicitud de servicio de UL (res. DL)
% longitudes de paquete de enlace ascendente y enlace descendente la, ma
la = 500;             % [bits]

```

```

ma = 5000; % [bits]
% u = 0.002; % Duración media de control: [seg]
% tau = 0.01; % Duración media de la señalización RA: [seg]
CF = 0.01; % tiempo de trama [seg]
lambda = 1/CF; % frecuencia de llegada de datos de control
BS-iniciada [por seg]
f1 = 0.5; % Porción de dispositivos de la clase 1 y 2
% -----
% Cobertura
% -----
c1 = 1; % Numero de retransmisiones clase 1
c2 = 2; % Numero de retransmisiones clase 2
R1=app.vup.Value; % velocidad de datos en uplink [bps]
R2 =app.vup2.Value; % velocidad de datos en uplink [bps]
dR1=app.vdl.Value; % velocidad de datos en downlink [bps]
dR2 =app.vdl2.Value; % velocidad de datos en downlink [bps]
Dsyn1 = 0.33; % Tiempo de retardo de sincronización [seg]
Dsyn2 = 0.66; % Tiempo de retardo de sincronización [seg]
% -----
% RRM (Gestión de recursos de radio)
% -----
b = 0.2; % fracción de tiempo en la que se programan
las señales de referencia
Tth = 2; % Tiempo máximo de espera para recibir el
mensaje RAR [seg]
M = 16; % Número de recursos RA M1y M2 16 preámbulos
% Intervalo de tiempo entre dos scheduling de NPRACH t con parámetro de diseño
% Intervalo de tiempo entre dos scheduling de NPCCCH d con parámetro de diseño

% -----
% Parámetros del Dispositivo
% -----
E0 = 1000; % Energía inicial del nodo [joule]
%----- Consumo de Potencia del dispositivo

Pt = 0.2; % Consumo de Potencia del dispositivo en transmisión [W]
PI = 0.01; % Consumo de Potencia del dispositivo en idle [W]
Pl = 0.1; % Consumo de Potencia del dispositivo en listening[W]
Pc = 0.01; % Consumo de Potencia del dispositivo por circuitos
electrónicos [W]
Pt1 = Pt; % potencia consumida en transmisión clase 1
Pt2 = Pt; % potencia consumida en transmisión clase 2
eps = 1; % Eficiencia de amplificación de potencia
Nrmax = 1; % número máximo de intentos permitidos
C = 2; % Numero de clases

```