



Revista de Investigación en Tecnologías de la Información
ISSN: 2387-0893
revista.riti@gmail.com
Universitat Politècnica de Catalunya
España

López Pujota, Catalina; Sinche Maita, Soraya
Simulación de un sistema de comunicaciones utilizando
la tecnología BN-IoT (Narrow Band-Internet of Things)
Revista de Investigación en Tecnologías de la
Información, vol. 10, núm. 21, Esp., 2022, pp. 71-87
Universitat Politècnica de Catalunya
España

DOI: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.007>

- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org





Simulación de un sistema de comunicaciones utilizando la tecnología BN-IoT (Narrow Band–Internet of Things)

Simulation of a communications system using BN-IoT technology (Narrow Band–Internet of Things)

Catalina López Pujota

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
catalina.lopez@epn.edu.ec

Soraya Sinche Maita

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
soraya.sinche@epn.edu.ec

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.007>

Recibido: Junio 06, 2022

Aceptado: Agosto 14, 2022

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. Este artículo propone un estudio de la tecnología NB-IoT, aspectos fundamentales de NB-IoT, arquitectura de red, bandas de frecuencias, protocolos de acceso, capas físicas y métricas de calidad de servicio. Además, presenta simulaciones del consumo de energía de los dispositivos NB-IoT durante la transmisión de datos en tres escenarios utilizando Matlab, así como parámetros requeridos para estas simulaciones. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos 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, los cuales muestran una variación del consumo de energía y del rendimiento de la vida útil de la batería en los dispositivos.

Palabras clave: *Internet of Things, 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. This article proposes a study of NB-IoT technology, fundamental aspects of NB-IoT, its architecture, frequency bands, access protocols, physical layers, and quality of service metrics. Also, presents simulations of the energy consumption of NB-IoT devices during data transmission in three scenarios using MATLAB, as well as the parameters required for these simulations. Finally, the results obtained are presented based on path losses, battery lifetime versus physical channels, coverage classes, data rate on links (uplink and downlink), and packets sent per day, these show a variation in power consumption and battery lifetime performance in the devices.

Keywords: *Internet of Things, NB-IoT, 3GPP, Latency, Battery Lifetime.*

1. Introducción

Con el crecimiento de los sistemas IoT (*Internet of Things*), surgen nuevas tecnologías de comunicación inalámbricas que permiten la conexión de gran cantidad de dispositivos, con tamaño de paquetes pequeños 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 está desplegando en diferentes países de América Latina tales como Chile, Colombia, Argentina, y Brasil [3]. Existen diferentes aplicaciones que logran 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 artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se ofrece una visión de la tecnología NB-IoT y sus características. En la sección 3 se describen los diferentes escenarios de simulación utilizando Matlab, donde se configuran los parámetros que permitan realizar el análisis de la tecnología. También se presenta un estudio del consumo de energía de los dispositivos NB-IoT durante la transmisión de datos con base a las clases de cobertura y un sistema de colas que genera expresiones matemáticas, analizando el consumo de energía, latencia del servicio y duración de la batería. Luego, en la sección 4 se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación de los escenarios analizados en la sección 3. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones correspondientes.

2. Narrow-Band IT (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*), diseñada para la comunicación de dispositivos de bajo costo para satisfacer las necesidades del cliente y el mercado emergente [5].

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, 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; lo que hace que sea competitiva en el mercado de IoT [5], [6]. 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 suministra energía a los dispositivos durante años. Actualmente, 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].
- Mejora el consumo de energía, en los *Releases* 12 y 13 se ha implementado eDRX (*Extended Discontinuous Reception*) y PSM (*Power Saving Mode*) [8].
- NB-IoT se conecta al *core network* de LTE, y es compatible con los servicios de red como seguridad, autenticación, políticas, monitoreo y facturación [9].

2.1. 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 CIoT (*Cellular Internet of Things*) que son: CIoT EPS en el plano de control y CIoT EPS para el plano de usuario [2]. La Figura 1 representa la optimización en el plano de control con la línea roja, mientras la optimización del plano de usuario se representa con la línea en azul.

2.1.1. Plano de Control para CIoT 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.

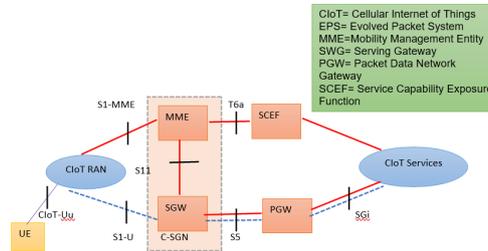


Figura 1. Arquitectura de red NB-IoT [2].

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) [10].

2.1.2. Plano de Usuario para CIoT EPS

En la optimización CIoT 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.

2.2. Stack de Protocolo de NB-IoT

El *stack* de protocolo NB-IoT se muestra en la Figura 2 que incluye las capas, tanto para el plano de control (señalización) como para el plano de usuario (transferencia de datos) [9]. Las funciones de cada capa se indica a continuación [7], [9] :

- **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.
- **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*):** utilizado para comprimir/descomprimir el encabezado de datos IP, transmisión de datos, cifrado, integridad y verificación de los datos del plano de control.
- **Capa RLC (*Radio Link Control*):** se utiliza para transmitir los datagramas UDP 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 [11]:
 - Mapear canales lógicos y canales de transporte.
 - Planificación (*scheduling*), asigna los recursos de manera aleatoria a los usuarios.
 - 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. Incluye los canales físicos para la comunicación de datos de control y datos de usuario.

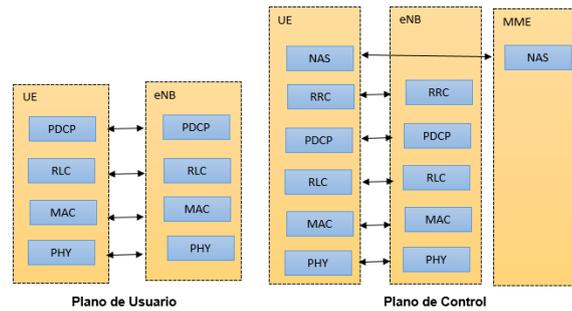


Figura 2. Stack de protocolos NB- IoT [9].

2.3. 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.

2.3.1. Modos de Funcionamiento

NB-IoT se implementa en 3 modos, de acuerdo con 3GPP: *Stand alone*, *Guard Band* y *In-Band* [5] (Figura 3).

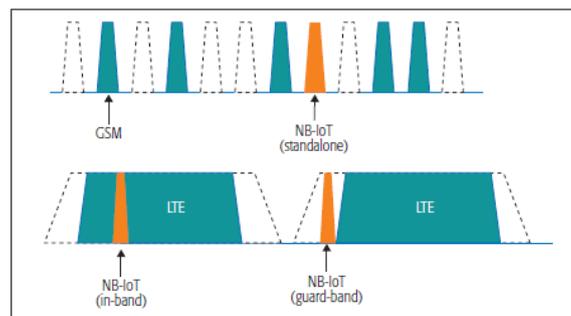


Figura 3. Modos de Operación de NB-IoT [5].

- **Operaciones Stand alone.** 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 [12].
- **Operaciones Guard Band.** Se 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 y un mejor rendimiento en el enlace DL [5].
- **Operaciones In-band.** Está diseñado para ser implementado en las redes LTE, utilizando la banda de guarda de LTE o PRBs (*Physical Resource Blocks*) de LTE, ocupando un ancho de banda de 180 kHz. [9]. La Tabla 1 muestra los índices de LTE PRB que se implementa 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. Índices LTE PRB permitidos para conexión celular para In-band NB-IoT [10].

Ancho de banda del sistema LTE	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Índices de LTE PRB debajo de la subportadora para 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 sobre la subportadora para 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

2.3.2. Canales Físicos de NB-IoT

Como se muestra en la Figura 4 para los canales físicos en DL, se definen tres canales de físicos y tres canales de señalización, multiplexados en el dominio del tiempo (TDD). Para el enlace 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*) [9], [12].

2.4. 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 [13].

2.4.1. Cobertura

NB-IoT define tres clases de cobertura en el canal NPRACH: Normal, Extendida, y 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 que consigan tener una comunicación confiable con la red, así sea con una velocidad de datos muy baja o reducida

2.4.2. 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 [14]. La latencia en NB-IoT depende de:

- Tamaño del bloque de transporte; relacionado con el tiempo de transmisión requerido y, por tanto, la cantidad de recursos de *scheduling*.
- Número 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 implementa 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.

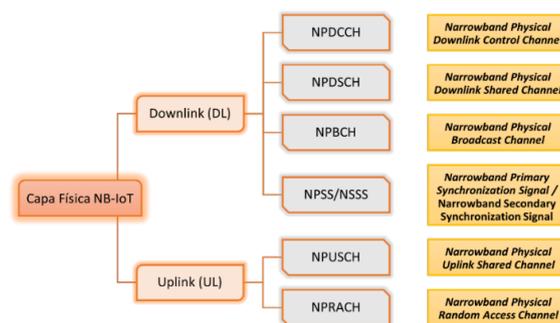


Figura 4. Canales de capa física de NB-IoT [9].

2.4.3. Duración de la Batería

Los Releases 12 y 13 del 3GPP introducen el modo de cobertura discontinua extendida (eDRX) y el modo de ahorro de energía (PSM), para admitir este tipo de trabajo y mejorar el consumo eléctrico del dispositivo.

Esencialmente, el dispositivo se apaga 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 [8].

3. Metodología para el desarrollo de las simulaciones utilizando la tecnología 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). En la Figura 5, se representa una red NB-IoT de ambiente externo compuesta de una BS (*Base Station*) con 10, 80 y 300 nodos ubicados aleatoriamente en línea de vista para cada escenario respectivamente. Los módulos NB-IoT brindan funcionalidad IoT, 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 muestra 5 canales físicos y 3 canales de señalización. Donde al asignar recursos de enlace UL y DL 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.

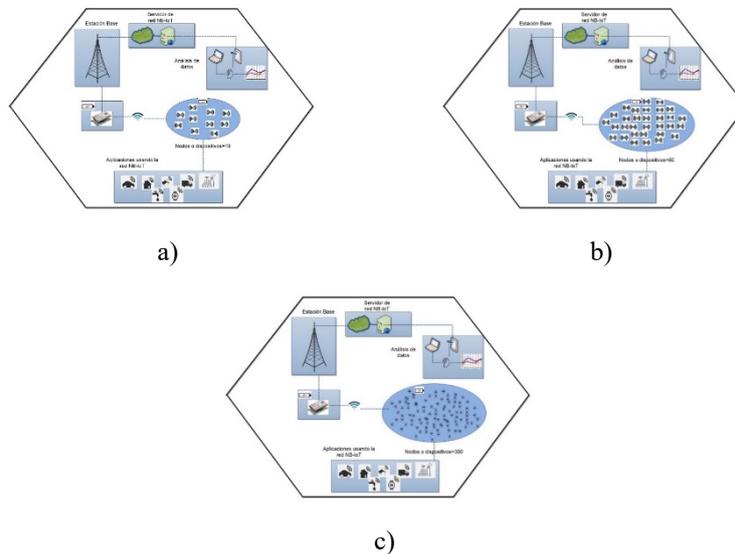


Figura 5. (a). ESCENARIO 1: Ambiente Externo con N=10. (b). ESCENARIO 2: Ambiente Externo con N=80 y (c). ESCENARIO 3: Ambiente Externo con N=300.

3.1. NB-IoT Acceso a la red

En general, una celda NB-IoT [15] 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 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 calcula como:

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

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 (NPSS y NSSS), cuándo un dispositivo NB-IoT requiere un servicio de enlace ascendente y descendente, y luego utilizando esta información se sincroniza con la BS. A continuación, *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 6 se muestra los intercambios realizados para NB-IoT.

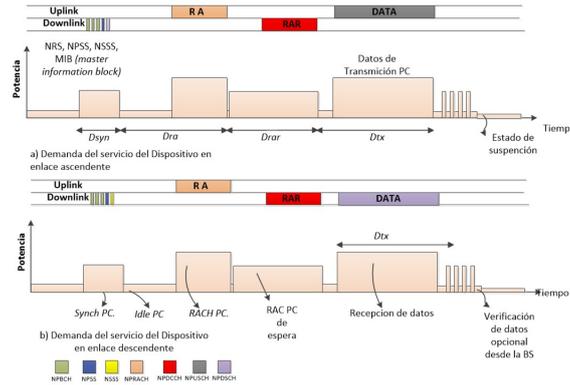


Figura 6. Intercambios de comunicaciones y consumo de energía en NB-IoT.

De acuerdo con la Figura 6, la latencia total en la comunicación para una solicitud de servicio de enlace UL/DL en base a la clase j ($c=1$ pérdida de ruta normal y $c=2$ para pérdida de ruta extrema) son respectivamente.

$$D_{uj} = D_{syj} + D_{txj} + D_{rrj} \quad (2)$$

$$D_{dj} = D_{syj} + D_{rxj} + D_{rrj} \quad (3)$$

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:

$$\xi_{uj} = E_{syj} + E_{txj} + E_{rrj} + E_s \quad (4)$$

$$\xi_{dj} = E_{syj} + E_{rxj} + E_{rrj} + E_s \quad (5)$$

Donde,

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

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

E_{rxj} : consumo de energía en la recepción de datos en *downlink*.

E_{rrj} : 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 define como la relación entre la energía almacenada y la energía consumida, debido a que el consumo de energía de un dispositivo se modela como un proceso de Poisson. En este caso, la vida útil esperada de la batería se calcula como:

$$L_j = \frac{E_0}{\xi_{uj}p_u S + (1 - p_u)S\xi_{dj}} [\text{días}] \quad (6)$$

Donde,

E_0 : energía almacenada en la batería del dispositivo.

ξ_{uj} : consumo promedio de energía en *uplink*.

ξ_{dj} : consumo promedio de energía en *downlink*.

3.2. Modelo de cola del protocolo de acceso NB-IoT

En los sistemas NB-IoT [15], 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 UL/DL, control y canales de datos como se muestra en la Figura 7, donde se modelan a dos servidores que trabajan para un sistema de colas de tráfico. El círculo rosa representa el servidor de enlace UL que atiende colas de dos canales, NPRACH y NPUSCH, mientras que el círculo azul representa el canal de enlace DL 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 τ 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 .

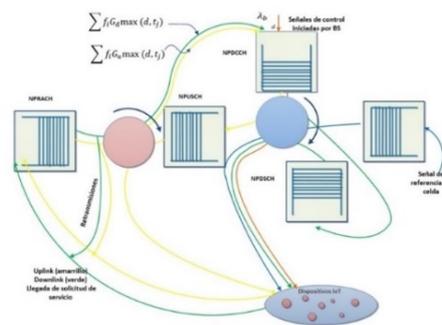


Figura 7. Sistema de colas en la red de acceso NB-IoT.

3.2.1. Expresiones matemáticas para los parámetros utilizados en la Simulación.

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

$$D_{rrj} = \sum_{l=1}^{N_{rmax}} P_j l (1 - P_j)^{l-1} (D_{rarj} + D_{raj}) \quad (7)$$

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_{rar_j} : representa la latencia esperada en la recepción del mensaje RAR.

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

La latencia en la recepción D_{ra_j} , representa una función del tiempo entre el *scheduling* de NPRACH y el tiempo medio de servicio. Mientras que D_{rar_j} depende del funcionamiento de NPDCCH. En la Figura 7, se observa a NPDCCH como un sistema de colas, en el que el servidor DL visita la cola cada d segundos y atiende las solicitudes existentes. Por tanto, se expresan de la siguiente manera:

$$D_{ra_j} = \tau c_j + \frac{1}{2} t_j \quad (8)$$

$$D_{rar_j} = \frac{1}{2} td + uc_j + \frac{1}{2} D_t Q \quad (9)$$

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

$$Q = \sum_{j=1}^c [f_j (G_d + G_u) \max\{t_j, td\}] + \{td + \lambda_{bs}\} \quad (10)$$

$$D_w = \frac{1}{2} Q D_t \quad (11)$$

Siendo λ_{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:

$$D_t = \sum_{j=1}^c f_j D_{tj}; \quad D_t = \sum_{j=1}^c f_j c_j u; \quad (12)$$

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 aproxima como $P_j = P_{JRACH} P_{JRAR}$.

La clase de nodo está 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}

$$P_{JRACH} = \sum_{K=2}^N \frac{(N_j)^k (M_j - 1)^{k-1} e^{-N_j}}{k! (M_j)^{k-1}}, \quad \text{siendo } N_j = f_j (G_d + G_u) t_j \quad (13)$$

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:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^c H(x - c_j u) f_j \quad (14)$$

$$F_n(x) = \sum_{j=1}^c F_{n-1}(x - c_j u) f_j \quad (15)$$

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:

$$P_{jRAR} = 1 - \sum_{K=2}^{\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \frac{Q^k k}{e^Q K K!} (F_{K-k-1}(T_{th})) (1 - F_{K-k}(T_{th})) \quad (16)$$

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 se calcula:

$$w = 1 - \sum_{j=1}^c (\tau c_j) (t_j)^{-1} \quad (17)$$

La llegada de solicitudes de servicio al NPUSCH se moldea 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 \mathcal{G} se expresa de la siguiente manera:

$$\mathcal{G} = \frac{\sum_{j=1}^c f_j t_j G_u}{C} \quad \text{siendo la tasa de llegada } \sum_{j=1}^c \frac{1}{t_j} \quad (18)$$

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).

$$S_a = \frac{1}{w} \sum_{j=1}^c \frac{f_j l_a c_j}{R_j} \quad y \quad S_b = \sum_{j=1}^c \frac{c_j^2 f_j l_b}{(w R_j)^2} \quad (19)$$

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

$$D_{txj} = \frac{R_j w \rho S_b + R_j w \mathcal{G} (S_a)^2 + 2 S_a (1 - \rho) c_j l_a}{2 R_j w S_a (1 - \rho)} \quad \text{siendo, } \rho = \sum_{j=1}^c S_a \mathcal{G} (t_j)^{-1} \quad (20)$$

Donde,

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

Del mismo modo, para el canal de UL (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:

$$y = \frac{1}{td} (td - b \cdot td - Q) \sum_{j=1}^c c_j f_j u \quad (21)$$

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

$$g = \sum_{j=1}^c \frac{f_j t_j G_d}{c} \quad \text{siendo la tasa de llegada } \sum_{j=1}^c \frac{1}{t_j} \quad (22)$$

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:

$$h_a = \frac{1}{y\mathbb{R}_j} \sum_{j=1}^c m_a f_j c_j; \quad y \quad h_b = \frac{1}{(y\mathbb{R}_j)^2} \sum_{j=1}^c m_b f_j c_j^2 \quad (23)$$

Siendo, \mathbb{R}_j es la tasa de datos del enlace DL 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 calcular de la siguiente manera:

$$D_{rxj} = \frac{\mathbb{R}_j y v h_b + \mathbb{R}_j y g (h_a)^2 + 2h_a(1-v)c_j m_a}{2(1-v)h_a \mathbb{R}_j y} \quad \text{donde } v = \frac{1}{t_j} \sum_{j=1}^c h_a \quad (24)$$

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} :

$$E_{syj} = D_{syj} \cdot P_l \quad (25)$$

$$E_{rarj} = D_{rarj} \cdot P_l \quad (26)$$

Para el consumo de energía en transmisión de datos en *uplink* E_{txj} :

$$E_{txj} = P_l \left(\frac{R_j \omega D_{txj} - c_j l_a}{\omega R_j} \right) + \frac{(\xi P_{tj} + P_c) l_a c_j}{\omega R_j} \quad (27)$$

Para el consumo de energía en la recepción de datos en *downlink* E_{rxj} :

$$E_{rxj} = P_l \left(\frac{\mathbb{R}_j y D_{rxj} - c_j m_a}{y \mathbb{R}_j} \right) + P_l \frac{m_a c_j}{y \mathbb{R}_j} \quad (28)$$

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

$$E_{rrj} = \sum_{l=1}^{N_{rmax}} P_j (1 - P_j)^{l-1} (E_{rarj} + E_{ra_j}) \quad (29)$$

$$E_{ra_j} = P_l (D_{ra} - c_j \tau) + c_j \tau (P_c + \xi P_{tj}) \quad (30)$$

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

$$L_j = E_o \left(S_p \left[E_{syj} + E_{rrj} + E_{txj} + E_s \right] \right) + \frac{S(1-p)}{\left[E_{syj} + E_{rrj} + E_{txj} + E_s \right]} \quad (31)$$

Donde,

ξ : expresa la eficiencia del amplificador de potencia.

P_j : 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 .

3.3. Modelo de Propagación

3.3.1. Modelo Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata [16] 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. Define un conjunto de ecuaciones 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.

3.3.1.1. Área Urbana

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

$$Lp(dB) = 69.55 + 26.16 \log(fc_{(MHz)}) - 13.82 \log(ht_{(m)}) + [44.9 - 6.55 \log(ht_{(m)})] \log(d_{(km)}) - a(hre) \quad (32)$$

Donde,

$Lp(dB)$: pérdidas de propagación.

fc : 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:

$$a(hre) = [1,1 \log fc_{(MHz)} - 0.7]hm_{(m)} - [1,56 \log fc_{(MHz)} - 0.8] \quad (33)$$

- **En ciudades grandes**

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

$$a(hre) = 8.29[\log(1.54hm_{(m)})]^2 - 1.1 \quad f \leq 300 \text{ MHz} \quad (34)$$

$$a(hre) = 3.2[\log(11.75hm_{(m)})]^2 - 4.97 \quad f \geq 300 \text{ MHz} \quad (35)$$

3.3.1.2. Área Suburbana

Áreas residenciales con edificaciones de baja altura,

$$L50 = Lp(urbano) - 2 \left[\log \left(\frac{fc_{(MHz)}}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (36)$$

3.3.1.3. 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:

$$L50 = Lp(urbano) - 4.78 \log(fc_{(MHz)})^2 + 18.33 \log(fc_{(MHz)}) - 40.94 \quad (37)$$

Donde,

hm : altura de la antena móvil en m .

3.4. Desarrollo de los escenarios en Matlab

En esta sección, se realizan simulaciones a nivel de enlace para validar el rendimiento del sistema NB-IoT de los tres escenarios mediante la herramienta Matlab versión R.2021a, basado en APP Designer. La Figura 8 presenta la topología según cada escenario, la cual está compuesta por una celda que cubren un área total de 65 km², con una BS 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 (Tabla 2).

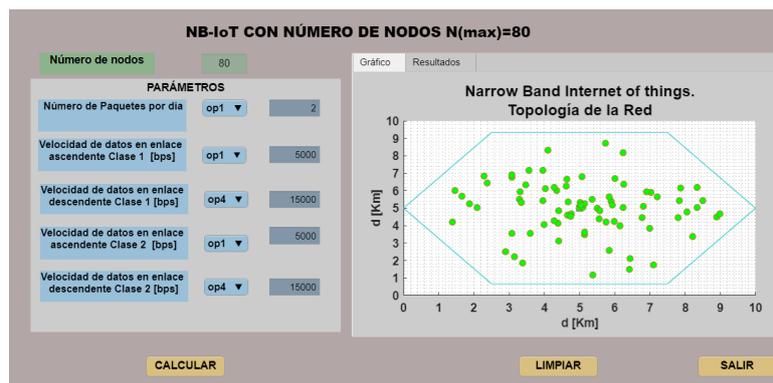


Figura 8. Topología de red NB-IoT y distribución de nodos.

4. Resultados

En esta sección, fueron validadas las expresiones matemáticas que permite el análisis de la latencia del servicio y la duración de la batería de los dispositivos IoT, en base a la cantidad de nodos, y la variación de parámetros como paquetes de datos, y velocidad de datos en enlace descendente y ascendente; Además, las simulaciones incluyen resultados de pérdidas de trayectoria utilizando el modelo Okumura-Hata. Los parámetros considerados para las simulaciones se basan en la Tabla 2.

Tabla 2. 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, τ	$u = 2$ ms, $\tau = 10$ ms
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	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, $UL_2 = 20$ Kbps
Cobertura	Tasa de datos en DL	DL_1, DL_2	$DL_1 = 5$ Kbps

			$DL_2 = 10 \text{ Kbps}$, $DL_1 = 12 \text{ Kbps}$ $DL_2 = 15 \text{ Kbps}$
Cobertura	Tiempo de retraso de sincronización	D_{sy1}, D_{sy2}	$D_{sy1} = 0.33 \text{ s}$ $D_{sy2} = 0.66 \text{ s}$
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 0
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	$M_1 = 16$, $M_2 = 16$
Dispositivo	Energía Inicial para un nodo	E_0	$E_0 = 1 \text{ KJoules}$
Dispositivo	Consumo de energía en del dispositivo en transmisión, <i>idle</i> y <i>listening</i>	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	$P_C = 0.01 \text{ W}$

4.1. Escenario 1: Ambiente Externo con número de Nodos=10

Esta simulación se analizó basándose en el número de paquetes de datos es fijo, pero varía las velocidades de datos del enlace descendente y ascendente. La Figura 9 (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. 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 transmisión 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 9 (a), que la vida útil máxima para la clase 1 se tiene $td=0.801$, $t=1$ con 8572.41 días; mientras la vida útil máxima para la clase 1 en Figura 9 (b) es $td=0,801$, $t=1$ con 7464.16 días.

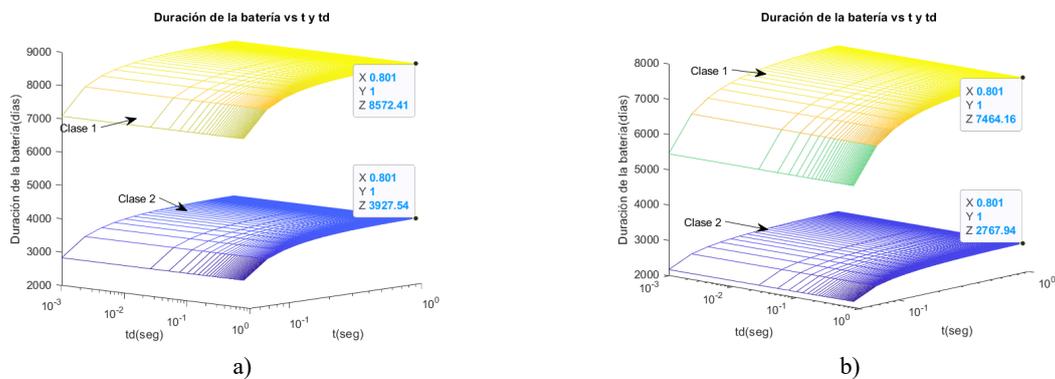


Figura 9. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos fijo y variación de velocidad de transmisión del enlace ascendente /descendente con $N=10$. (a) Duración de la batería con t vs d , paquete de datos=2, C1: UL=10kbps, DL=12kps y C2: UL=5kbps, DL=15kps. (b) Duración de la batería vs t y d , paquete de datos=2, C1: UL=5kbps, DL=12kps y C2: UL=5kbps, DL=5kps.

4.2. Escenario 2: Ambiente Externo con número de Nodos=80

Para analizar este escenario se considera el número de paquetes de datos variables, mientras las velocidades de datos de UL y DL permanecen fijas. Para la Figura 10 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 se reduce la latencia y mejorar la confiabilidad. Es decir, al comprimir los paquetes y reducir el tiempo esperado en la reserva de recursos se prolonga con éxito la duración de la batería de los dispositivos. Según la Figura 10 (a) para la clase 1, se tiene $td=0.726$, $t=1$ con 1599.08 días; mientras para en (b) para la clase 1, $td=0.526$, $t=1$ con 399.59 días, de lo que se concluye que al aumentar la cantidad de paquetes enviados reduce la vida útil de la batería.

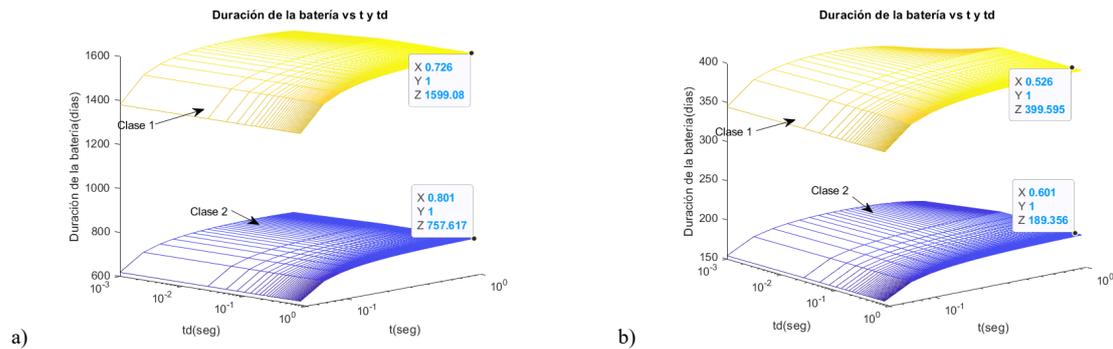


Figura 10. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos variable y velocidad de transmisión del enlace UL/DL fijo con $N=80$. (a). Duración de batería vs t y d , paquete de datos=12, C1: UL=15kbps, DL=15kps y C2: UL=10kps, DL=15kbps. (b). Duración de batería vs t y d , paquete de datos=48, C1: UL=15kbps, DL=15kps y C2: UL=10kps, DL=15kbps.

4.3. Escenario 3: Ambiente externo con número de Nodos=300

Para el análisis se considera el número de paquetes de datos variables, mientras las velocidades de datos de UL y DL permanecen fijas. Se observa que al implementar más paquetes a la red NB-IoT reduce la vida útil de la batería, como se muestra en la Figura 11 (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 $td=0.476$ y $t=1$ con 217.54 días.

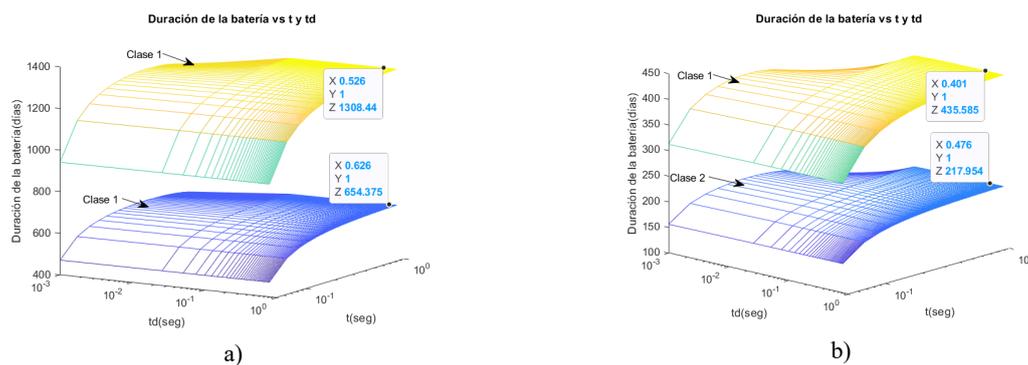


Figura 11. Tiempo de vida de la batería del dispositivo NB-IoT con paquetes de datos variable y velocidad de transmisión del enlace UL/ DL fija con $N=300$. (a). Duración de batería vs t y d , paquete de datos=12, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps, DL=15kbps. (b). Duración de batería vs t y d , paquete de datos=36, C1: UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps, DL=15kbps.

La Figura 12 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 c2, 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 ve 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.

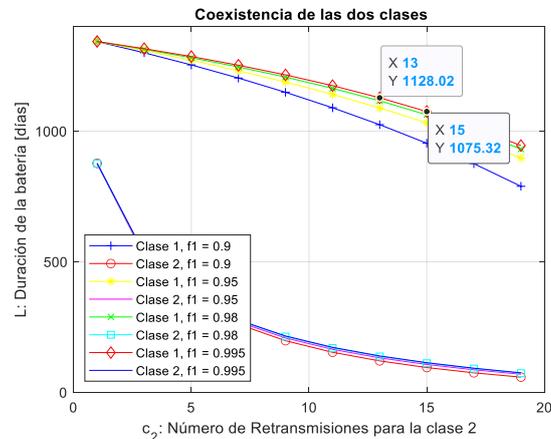


Figura 12. Duración de la batería de los dispositivos vs el número de repeticiones ($\tau = 2\text{ms}$, $d=10\text{ms}$, $t=65\text{ms}$, C1: paquete de datos=12, UL=5kbps, DL=15kps y C2: UL=5kps y DL=15kps).

Finalmente, en la Figura 13 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.

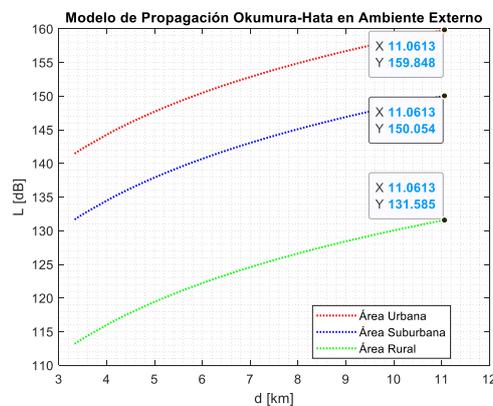


Figura 13. Pérdidas en el Escenario 3 para diferentes ambientes.

5. Conclusiones

NB-IoT proporciona características técnicas eficientes que son capaces de responder a nuevos requisitos que imponen los dispositivos IoT, permitiendo desarrollar diversas aplicaciones con bajo consumo de potencia. Al evaluar el consumo de energía en los 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, a más 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 de $N = 80$ a $N = 300$, el tráfico entrante se analiza mediante la implementación de un modelo de colas. A través de las expresiones matemáticas indicadas en la sección 0 se consigue optimizar los *scheduling* de los canales de datos en los enlaces *Dowlink* 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.

6. Referencias

- [1] Lin, Y. B., Tseng, H. C., Lin, Y. W., Chen, L. J. (2019). NB-IoTtalk: A Service Platform for Fast Development of NB-IoT Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 6 (1), 928-939. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2865583>
- [2] Sinha, R. S., Wei, Y., Hwang, S. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3 (1), 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- [3] Routray, S. K., Sharmila, K. P., Akanskha, E., Ghosh, A. D., Sharma, L., Pappa, M. (2021). *Narrowband and IoT (NB-IoT) for Smart Cities*. Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). Tirunelveli, India. <https://doi.org/10.1109/ICICV50876.2021.9388513>
- [4] Mangalvedhe, N., Ratasuk, R., Ghosh, A. (2016). *NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT*. IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Valencia, España. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2016.7794567>
- [5] Beyene, Y. D., Jantti, R., Tirkkonen, O., Ruttik, K., Iraj, S., Larmo, A., Tirronen, T., Torsner, J. (2017). NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation. *IEEE Wireless Communications*, 24 (3), 26-32. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600418>
- [6] Díaz Zayas, A., Merino Gómez, P., Rivas Tocado, F. (2018). *3GPP NB-IoT, tecnología y herramientas de medida*. XIII Jornadas de Ingeniería telemática (JITEL). Valencia, España. <https://doi.org/10.4995/JITEL2017.2017.6577>
- [7] Routray, S., Hussein, H. M. (2019). *Narrowband IoT: An Appropriate Solution for Developing Countries*. <http://arxiv.org/abs/1903.04850>
- [8] Kumar Sultania, A., Zand, P., Blondia, C., Famaey, J. (2019). *Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX*. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Dhabi, United Arab Emirates. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644074>
- [9] Bhebhe, M. (2019). *Performance of Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) Networks* [Master Thesis]. University of Cape Town. <https://open.uct.ac.za/handle/11427/31533>
- [10] Viscaino Gavilanes, J. J. (2018). *Evaluación de rendimiento de las tecnologías 802.11 y LTE para proveer servicios web en redes vehiculares AD-HOC* [Tesis de Maestría]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/8348>
- [11] Schlien, J., Raddino, D. (2016). *Narrowband Internet of Things Whitepaper*. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf
- [12] Liberg, O., Sundberg, M., Eric Wang, Y. P., Bergman, J., Sachs, J., Wikström, G. (2020). NB-IoT. En *Cellular Internet of Things* (2nd. Ed.) (pp. 273-402). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102902-2.00007-8>
- [13] Mendes da Cruz, R. (2019). *Network Planning Model for NB-IoT* [Master Thesis]. Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/122689/2/357491.pdf>
- [14] Afzal, J. (2017). *NB-IoT - Data Rates and Latency*. <https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=blog&no=12609&xtag=iot-nb-iot&xref=nb-iot-data-rates-and-latency>
- [15] Azari, A., Miao, G., Stefanovic, C., Popovski, P. (2018). *Latency-Energy Tradeoff based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems*. <http://arxiv.org/abs/1807.05602>
- [16] Fernández Orqueda, L. A. (2014). *Estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh en el modelo de propagación Okumura-Hata en base a MATLAB* [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7322>