



# Estudio de NB-IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN

**Maria Luisa Machado González**

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL  
Telemática

**Jose López Vicario**

**Xavi Vilajosana Guillen**

Enero 2019

Copyright© 2019, Maria Luisa Machado  
González

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Estudio de NB-IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Maria Luisa Machado González</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Jose López Vicario</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Xavier Vilajosana Guillen</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	01/2019
<b>Titulación:</b>	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Telemática</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>LPWAN NB-IoT LoRa Sigfox</i>
<b>Resumen del Trabajo</b>	
<p>Debido al rápido crecimiento del mercado de Internet of Things (IoT), las redes de área amplia y baja potencia (LPWAN) se han convertido en populares tecnologías de comunicación radio de baja tasa de datos y larga distancia. NB-IoT, LoRA y Sigfox son las tecnologías LPWAN líderes, que compiten por el despliegue de IoT a gran escala, al ser soluciones eficientes para la conexión de dispositivos heterogéneos, inteligentes y autónomos. Sin embargo, debido a que son tecnologías de reciente aparición, la información que se puede encontrar sobre su comportamiento en escenarios reales es limitada, surgiendo la necesidad de crear entornos simulados para la valoración de su rendimiento.</p> <p>En el presente trabajo se realiza un estudio en profundidad del sistema NB-IoT y la caracterización de las tecnologías LoRa y Sigfox, para realizar una comparativa entre ellas según características técnicas y factores IoT, así como, evaluar ventajas, desventajas y casos de uso que más se ajustan a cada una. Finalmente, se realiza la simulación en Matlab de su comportamiento en distintos escenarios, como áreas rurales o urbanas, con el objetivo de determinar cuál de los tres sistemas proporciona la mejor cobertura para los dispositivos IoT, incluyendo localizaciones en el interior de distintos tipos de edificios.</p>	

## **Abstract**

Because of the rapid growth of the Internet of Things (IoT) market, low power wide area networks (LPWAN) have become a popular low-rate long-range radio communication technology. NB-IoT, LoRa and Sigfox are the three leading LPWAN technologies that compete for large-scale IoT deployment, due to their efficient solutions to connect heterogeneous, smart, and autonomous devices. However, because they are new technologies, the information that can be found about their behavior in real scenarios is still limited, arising the need to create simulated environments for the evaluation of their performance.

In this dissertation an in-depth study of the NB-IoT system and the characterization of the LoRa and Sigfox technologies is carried out, to make a comparison between them according to technical characteristics and IoT factors, as well as to evaluate advantages, disadvantages and use cases that best fit each. Finally, the simulation in Matlab of its behavior in different scenarios, such as rural or urban areas, is performed in order to determine which of the three systems provides the best coverage for IoT devices, including locations inside different types of buildings.

# Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.2 Objetivos del Trabajo.....	2
1.3 Enfoque y método seguido.....	2
1.4 Planificación del Trabajo.....	2
1.5 Breve resumen de productos obtenidos.....	4
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	4
2. Estado del arte.....	5
3. Descripción del estudio.....	7
3.1 Visión general de LPWAN.....	7
3.1.1 LoRa.....	8
3.1.2 Sigfox.....	11
3.2 Estudio de la tecnología NB-IoT.....	14
3.2.1 Evolución de los estándares 3GPP para MTC/IoT.....	14
3.2.2 Arquitectura de red.....	14
3.2.3 Bandas de frecuencia.....	16
3.2.4 Capa física.....	16
3.2.4.1 Enlace descendente (Downlink).....	18
3.2.4.2 Enlace ascendente (Uplink).....	27
3.2.4.3 Opciones de despliegue.....	30
3.2.4.4 Control de potencia.....	31
3.2.5 Acceso a celda.....	32
3.2.5.1 Pilas de protocolo y portadora de señalización.....	33
3.2.5.2 Información de sistema.....	33
3.2.5.3 Selección de celda y movilidad.....	35
3.2.5.4 Procedimiento de acceso aleatorio.....	35
3.2.5.5 Control de conexión.....	37
3.2.5.6 Transferencia de capacidad del UE.....	39
3.2.5.7 Paging.....	39
3.2.6 Transferencia de datos.....	40
3.2.6.1 Optimización ClOT EPS en el plano de control.....	40
3.2.6.2 Optimización ClOT EPS en el plano de usuario.....	40
3.2.7 Características en términos de factores IoT.....	43
3.3 Comparativa entre tecnologías LPWAN.....	45
3.3.1. Diferencias técnicas.....	45
3.3.2 Diferencias en términos IoT.....	46
4. Ventajas y desventajas de cada sistema y casos de uso.....	49
5. Simulación del comportamiento de las diferentes tecnologías.....	51
5.1 Análisis de los casos de estudio.....	51
5.2 Métodos de cálculo.....	52
5.3 Modelado de la simulación.....	54
5.3.1 Introducción.....	54
5.3.2 Estructura del programa.....	55
5.4 Comparación de resultados.....	58
5.4.1 En exteriores.....	58
5.4.2 En interiores.....	60

5.4.3 Conclusiones .....	63
6. Conclusiones.....	64
7. Glosario .....	65
8. Bibliografía .....	66
9. Anexos .....	69

## Lista de figuras

- Ecuación 1.** Tasa de bit en la modulación LoRa  
**Ecuación 2.** Potencia de slot  
**Ecuación 3.** MCL (Pérdidas máximas de acoplamiento)  
**Ecuación 4.** Pérdidas de trayecto Okumuram-Hata  
**Ecuación 5.** Factor de compensación medioambiental Okumuram-Hata  
**Ecuación 6.** Pérdidas de propagación UIT-R P.1238-9  
**Tabla 1.** Correspondencia entre entregas parciales y actividades de trabajo  
**Tabla 2.** Publicaciones sobre LPWAN  
**Tabla 3.** Publicaciones sobre NB-IoT para comunicación M2M  
**Tabla 4.** Publicaciones sobre nuevos algoritmos NB-IoT  
**Tabla 5.** Trabajos para el ahorro de energía en NB-IoT  
**Tabla 6.** Trabajos sobre plataformas de simulación y prototipos NB-IoT  
**Tabla 7.** Evolución de las categorías UE para MTC/IoT  
**Tabla 8.** Resumen parámetros de uplink y downlink  
**Tabla 9.** Formatos DCI  
**Tabla 10.** Duración de unidad de recursos con espaciado de subportadora de 15kHz para el formato NPUSCH 1  
**Tabla 11.** Contenido de SIB-NB  
**Tabla 12.** Comparativa entre características técnicas de LoRa, Sigfox y NB-IoT  
**Tabla 13.** Comparación de costes de LoRa, Sigfox y NB-IoT  
**Tabla 14.** Comparativa entre características IoT de LoRa, Sigfox y NB-IoT  
**Tabla 15.** MCL de las diferentes tecnologías LPWAN  
**Tabla 16.** Coeficientes de pérdida de potencia N  
**Tabla 17.** Factores de pérdida de penetración en el suelo  $L_f$  (dB)  
**Tabla 18.** Parámetros tecnologías LPWAN  
**Tabla 19.** Parámetros de enlace de simulación en exterior  
**Tabla 20.** Parámetros de simulación en espacios interiores  
**Tabla 21.** Resumen de los resultados de cobertura simulados  
**Figura 1.** Tecnologías MTC  
**Figura 2.** Diagrama de Gantt  
**Figura 3.** Características de las distintas tecnologías radio  
**Figura 4.** Arquitectura de la red LoRaWAN  
**Figura 5.** Las tres clases de dispositivos reciben tiempo de slot  
**Figura 6.** Trama MAC de uplink de Sigfox  
**Figura 7.** Trama MAC de downlink de Sigfox  
**Figura 8.** Arquitectura de red Sigfox  
**Figura 9.** Arquitectura de red de datos NB-IoT  
**Figura 10.** Grid de recursos para un slot.  
**Figura 11.** Estructura de trama NB-IoT para subportadora de 15kHz  
**Figura 12.** Grid de recursos para espaciado de subportadora de 3.75 kHz.  
**Figura 13.** Mapeo de los canales de transporte (Tr CH) a los canales físicos (PHY CH)  
**Figura 14.** Multiplexación en el tiempo de señales y canales físicos de downlink NB-IoT  
**Figura 15.** Mapeo básico de señales de referencia a los elementos de recursos  
**Figura 16.** Mapeo NPSS  
**Figura 17.** Mapeo NSSS  
**Figura 18.** Mapeo NPBCH a las subtramas

- Figura 19.** Mapeo de NPBCH en un bloque de recursos
- Figura 20.** Elementos de recursos utilizados por NPDCCH
- Figura 21.** Mapeo entre los canales de transporte (Tr CH) y los canales físicos (PHY CH) en uplink
- Figura 22.** Grupo de símbolos de un preámbulo NPRACH
- Figura 23.** Elementos de recurso utilizados para DMRS en formato NPUSCH 1
- Figura 24.** Elementos de recurso utilizados para DMRS en formato NPUSCH 2
- Figura 25.** Uso del espectro según opciones de despliegue
- Figura 26.** Pilas de protocolos para NB-IoT
- Figura 27.** Flujo de mensajes para el procedimiento RACH
- Figura 28.** Modelo de los estados del RRC y sus transiciones
- Figura 29.** Establecimiento de conexión RRC
- Figura 30.** Solicitud de reanudación de conexión RRC aceptada por el eNB
- Figura 31.** Solicitud de reanudación de conexión RRC no aceptada por el eNB
- Figura 32.** Release de la conexión RRC
- Figura 33.** Transferencia de capacidad de UE
- Figura 34.** Establecimiento del nivel de seguridad AS
- Figura 35.** Procedimiento de reconfiguración de la conexión RRC
- Figura 36.** Ventajas de Sigfox, LoRa y NB-IoT en términos de factores IoT
- Figura 37.** Maximum Coupling Loss (MCL)
- Figura 38.** Interfaz Menú Principal
- Figura 39.** Interfaz Simulación del enlace
- Figura 40.** Diagrama de flujo de la interfaz Simulación del enlace
- Figura 41.** Interfaz Simulación en espacios interiores
- Figura 42.** Diagrama de flujo de la interfaz Simulación en interiores
- Figura 43.** Comportamiento de NB-IoT en entorno rural, suburbano y urbano
- Figura 44.** Comportamiento de LoRa en entorno rural, suburbano y urbano
- Figura 45.** Comportamiento de Sigfox en entorno rural, suburbano y urbano
- Figura 46.** Comportamiento de NB-IoT en el interior de una fábrica
- Figura 47.** Comportamiento de NB-IoT en el sótano de edificación residencial
- Figura 48.** Comportamiento de LoRa en el interior de una fábrica
- Figura 49.** Comportamiento de LoRa en el sótano de edificación residencial
- Figura 50.** Comportamiento de Sigfox en el interior de una fábrica
- Figura 51.** Comportamiento de Sigfox en el sótano de edificación residencial



# 1. Introducción

## 1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Se está produciendo una extraordinaria penetración y popularidad de Internet de las cosas (IoT) con altas demandas de comunicaciones entre dispositivos (MTC), existiendo un enorme interés en integrar soluciones de conectividad con sensores, actuadores, medidores, automóviles, electrodomésticos, etc. [10], [11], por lo que el IoT se está expandiendo constantemente.

IoT consiste en una serie de redes con diferentes objetivos de diseño, las MTC utilizan distintas tecnologías que se pueden desglosar según la cobertura y la tasa de transmisión de datos, como se muestran en la figura 1.

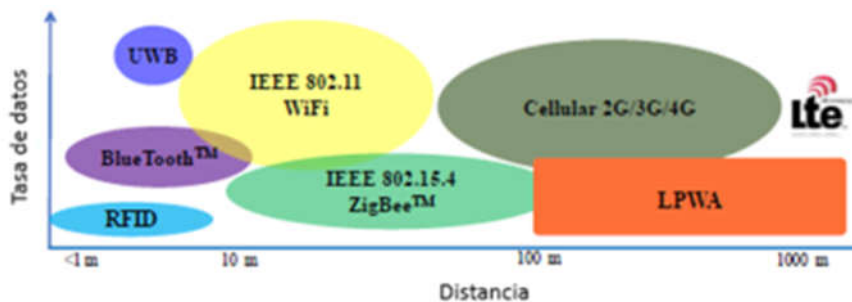


Figura 1. Tecnologías MTC [17]

Las tecnologías LPWAN (red de área amplia de baja potencia) están diseñadas para una distancia de transmisión de más de un kilómetro, con bajo consumo de energía y soportando transmisión de datos en banda estrecha, todo ello con un bajo coste de comunicación. Estas tecnologías utilizan tanto banda de espectro no licenciada (es el caso de LoRa y Sigfox), como bandas bajo licencia 2/3/4G (por ejemplo, EC-GSM, LTE eMTC y NB-IoT).

Reconociendo la importancia de IoT, el Third Generation Partnership Project (3GPP) ha introducido una serie de características clave para IoT en su Release 13, entre ellas, la tecnología Narrowband IoT (NB-IoT) [13], cuyos objetivos son extensión de cobertura, reducción de la complejidad del equipo del usuario (UE) y larga duración de la batería, ofreciendo además flexibilidad de implementación, lo que permite a un operador introducir NB-IoT utilizando una pequeña parte de su espectro disponible existente.

Las principales características de NB-IoT son un bajo consumo de energía (10 años de vida útil de baterías), bajo coste (chip terminal a 1\$), conexiones masivas (50000 terminales por celda) y elevada cobertura, puede satisfacer los requisitos de mejora de cobertura en localizaciones complicadas como sótanos.

La característica de cobertura se estudiará en el presente Trabajo Fin de Máster mediante la simulación en Matlab. Además, se comparará con otras LPWAN (Sigfox y Lora), estudiando sus ventajas y desventajas, de forma que el lector posea las herramientas para seleccionar la tecnología más apropiada para una aplicación IoT determinada.

## 1.2 Objetivos del Trabajo

Los principales objetivos son:

- Caracterización de redes Low Power Wide Area Network (LPWAN).
- Análisis y estudio de la tecnología Narrow Band-IoT (NB-IoT).
- Comparativa de NB-IoT con otras tecnologías LPWAN.
- Análisis de ventajas y desventajas de los sistemas y casos de usos.
- Modelado en Matlab del comportamiento de cobertura de NB-IoT, LoRa y Sigfox.
- Análisis de los resultados de la simulación.

## 1.3 Enfoque y método seguido

Este Trabajo Fin de Máster ha seguido una evolución teórico-práctica, comenzando con una etapa inicial de análisis “de arriba a abajo”, realizando un estudio de las tecnologías Sigfox, LoRA y NB-IoT, profundizando en la investigación de NB-IoT, así como una reflexión sobre pros y contras de los sistemas considerados y casos de uso más adecuados para cada caso. Finalmente se realiza el modelado de dichos sistemas en Matlab, para la simulación de los estándares en distintos entornos, estudiando sus capacidades de cobertura y sacar conclusiones sobre su comportamiento.

Para alcanzar los objetivos planteados, se han llevado a cabo las etapas de planificación y ejecución y control de acuerdo al modelo de referencia PMBOK, estableciéndose una serie de bloques de trabajo bien definidos, así como una serie de puntos de seguimiento para alcanzar los estándares de calidad deseados, de acuerdo al tiempo y alcance establecidos.

## 1.4 Planificación del Trabajo

La planificación de este trabajo se ha realizado mediante bloques de actividades que se corresponden con hitos parciales, consecuentes con lo establecido en el plan docente, véase tabla 1 y diagrama de Gantt (figura 2) con la planificación detallada de este TFM.

Entregas	Actividades	Fecha
<b>Propuesta TFM</b>	N/A	26/09/2018
<b>PEC 1: Planificación del trabajo</b>	Introducción y planificación	03/10/2018
<b>PEC 2: Primera entrega del proyecto (60% trabajo técnico)</b>	- Estado del arte - Estudio y comparativa de LPWAN	14/11/2018
<b>PEC 3: Segunda entrega del proyecto (100% trabajo técnico)</b>	- Diseño de la simulación - Simulación y valoraciones	19/12/2018
<b>Entrega de la memoria final</b>	Realización de la memoria	08/01/2019
<b>Entrega de la presentación</b>	Realización de la presentación	13/01/2019
<b>Inicio del tribunal</b>	Defensa del TFM	14/01/2019
<b>Final del tribunal</b>		20/01/2019

Tabla 1. Correspondencia entre entregas parciales y actividades de trabajo

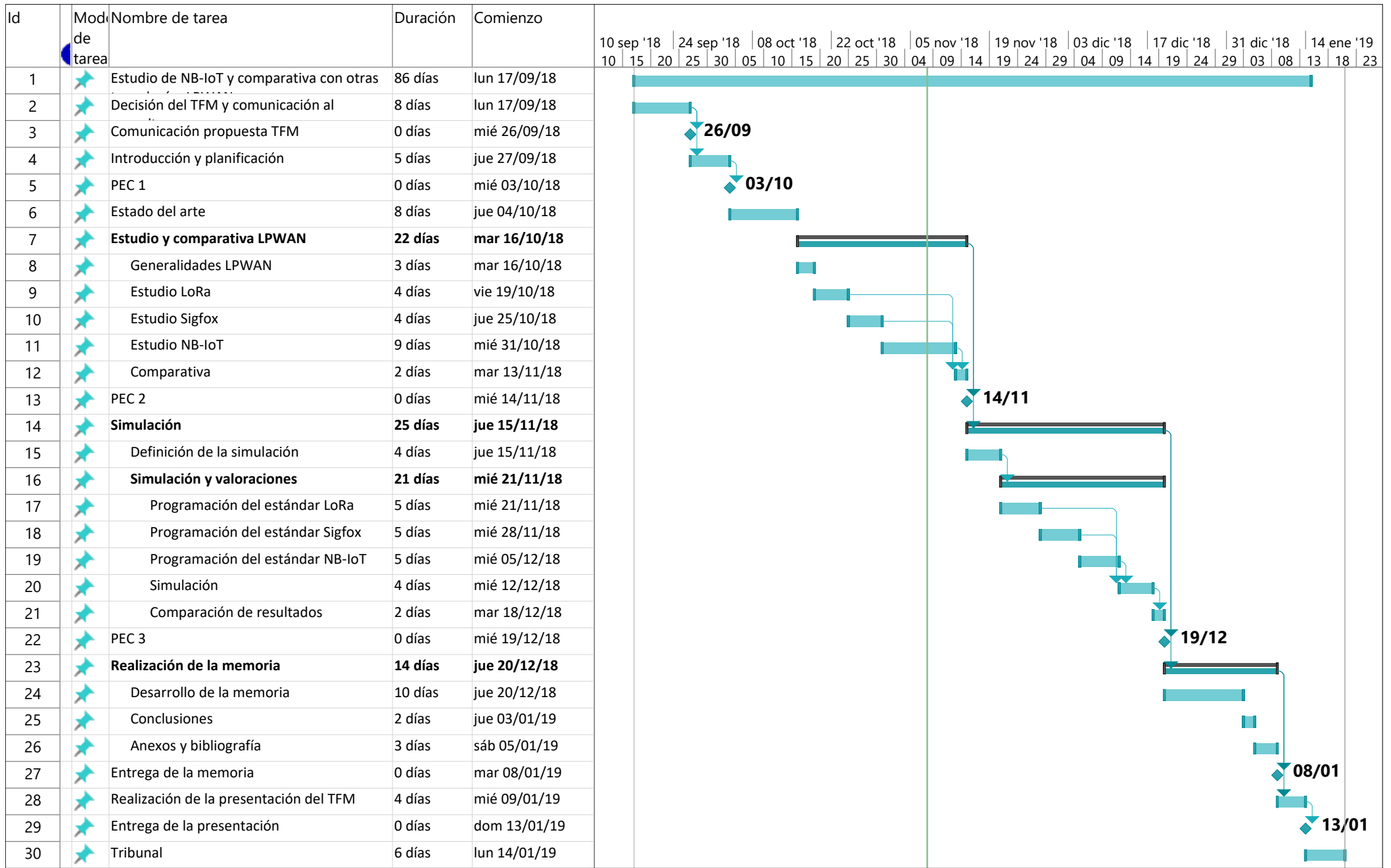


Figura 2. Diagrama de Gantt

## 1.5 Breve resumen de productos obtenidos

- Análisis de la tecnología LoRa.
- Análisis de la tecnología Sigfox.
- Análisis de la tecnología NB-IoT.
- Comparativa entre las distintas tecnologías LPWAN.
- Modelado en Matlab del comportamiento del sistema NB-IoT.
- Modelado en Matlab del comportamiento del sistema LoRa.
- Modelado en Matlab del comportamiento del sistema Sigfox.
- Captura y análisis de los resultados de la simulación.

## 1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Los próximos capítulos desarrollados en esta memoria son los que siguen:

- Capítulo 2: Estado del arte. Investigación documental como punto de partida para conocer la situación tecnológica actual, sus ventajas e inconvenientes y poder abordar el análisis detallado del estudio de las tecnologías LPWAN, especialmente NB-IoT.
- Capítulo 3: Descripción del estudio. Descripción de la información obtenida del estudio de las tecnologías LPWAN (LoRa y Sigfox) y del estudio en detalle de NB-IoT.
- Capítulo 4: Reflexión sobre las ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas en el capítulo anterior y casos de uso.
- Capítulo 5: Simulación del comportamiento de las diferentes tecnologías. Se expone el estudio de la cobertura de los sistemas NB-IoT, Lora y Sigfox en entorno urbano, suburbano y rural, utilizando para ello la simulación de su comportamiento mediante Matlab.
- Capítulo 6: Conclusiones. Lecciones aprendidas durante el desarrollo del trabajo, análisis del grado de consecución de objetivos según el alcance inicial y líneas futuras de trabajo.
- Capítulo 7: Glosario. Definición de términos y acrónimos relevantes, utilizados en esta memoria.
- Capítulo 8: Bibliografía. Referencias bibliográficas utilizadas en la presente memoria.
- Capítulo 9: Anexos. Código de la programación en Matlab del simulador.

## 2. Estado del arte

Para el desarrollo de este trabajo y como punto de partida para conocer la situación tecnológica actual, sus ventajas e inconvenientes y poder abordar el análisis de las tecnologías LPWAN, especialmente NB-IoT, se ha hecho un estudio de las publicaciones e investigaciones y de la información aportada por los diferentes grupos que regulan las tecnologías concernientes a este TFM.

Debido al gran avance del IoT y a que las especificaciones de LPWAN hacen que estas tecnologías tengan un gran potencial para su implementación y desarrollo, abundan las publicaciones sobre el estudio de las mismas, algunas de ellas, cuyo principal propósito es la descripción y comparativa entre tecnologías LPWAN, se presentan en la tabla a continuación:

Publicación y autor	Tecnologías	Estudio
[36] K. Mekki et al.	Sigfox LoRa NB-IoT	-Características de comunicación y físicas -Factores de IoT -Escenarios de aplicación
[20] R.S. Sinha et al.	LoRa NB-IoT	-Características físicas -Arquitectura de red -Protocolo MAC -Factores IoT -Escenarios de aplicación -Estado actual en Asia
[48] Y. Songa et al.	NB-IoT LoRa GPRS	-Revisión técnica -Propone arquitectura para IoT -Escenarios de aplicación
[38] U. Raza et al.	LoRa Sigfox NB-IoT Telensa Etc.	-Diseño y técnicas utilizadas para ofrecer cobertura de área amplia -Estudio de actividades de estandarización. -Retos y líneas futuras.

Tabla 2. Publicaciones sobre LPWAN

Debido a que NB-IoT todavía está en sus inicios y hay muchas cuestiones teóricas y prácticas que deben abordarse, existen muchas publicaciones en relación a este sistema para la comunicación M2M, entre ellas:

Publicación y autor	Estudio
[21] R. Ratasuk et al.	-Propiedades físicas de NB-IoT
[22] M. Chen et al.	-Objetivos de diseño de NB-IoT
[23] Mangalvedhe et al.	-Uso de infraestructura LTE para desarrollar e investigar NB-IoT -Estudio de despliegue parcial de NB-IoT
[24] Adhikary et al.	-Comparación de cobertura de NB-IoT con LTE
[25] Lauridsen et al.	-Comparación de cobertura de LTE-M y NB-IoT en región suburbana

Tabla 3. Publicaciones sobre NB-IoT para comunicación M2M

Además de lo anterior, recientemente, se han aplicado nuevos algoritmos y protocolos a NB-IoT para su mejora:

Publicación y autor	Estudio
[26] Lin et al.	Desarrollo de algoritmo receptor para la detección NPRACH y la estimación del tiempo de llegada.
[27] Ali y Hamouda	Algoritmo para la búsqueda de células NB-IoT y la sincronización inicial.

Tabla 4. Publicaciones sobre nuevos algoritmos NB-IoT

También, desde la perspectiva del ahorro de energía, existen diferentes trabajos:

Publicación y autor	Estudio
[28] Kroll et al.	Realización de hardware para la detección mediante correlación cruzada de la sincronización inicial de dispositivos NB-IoT, en lugar de la utilizada autocorrelación.
[29],[30] G. Fortino et al.	Simulación y modelado basado en agentes para analizar el rendimiento de los sistemas de IoT.
[31],[32] H. Liu et al.	Nuevos esquemas de negociación de recursos entre las tareas de detección dinámica y los sensores de IoT, para controlar los ciclos de trabajo del dispositivo para ahorrar energía.
[46] Tsoukaneri y Condoluci	Mejoras en MBMS para uso eficiente de recursos y consumo de energía en el enlace ascendente.

Tabla 5. Trabajos para el ahorro de energía en NB-IoT

En cuanto a plataformas de simulación y prototipos para investigación y aplicaciones específicas destacan las siguientes:

Publicación y autor	Estudio
[17] Chen et al.	-Sistema prototipo con dispositivos NB-IoT, plataforma en la nube, servidor de aplicaciones y aplicación de usuario. -Marco sobre cómo aplicar NB-IoT a aplicaciones específicas.
[47] Miao et al.	-Plataforma de simulación y verificación de nivel de enlace NB-IoT basada en OPNET.

Tabla 6. Trabajos sobre plataformas de simulación y prototipos NB-IoT

Como se puede observar, dado el gran interés que suscita NB-IoT, existe gran cantidad de trabajos sobre sus funcionalidades, posibilidades de desarrollo, mejoras, etc. Lo que pretende aportar el presente Trabajo Fin de Máster es un modelado basado en Matlab, que refleje visualmente las capacidades de NB-IoT en entornos específicos, simulando especialmente su rendimiento en cuanto a cobertura en un escenario poco privilegiado como es un entorno urbano, y que permita someter a test y verificar las características de su capa física y acumular experiencias para una posible implementación de aplicaciones en el mundo real.

### 3. Descripción del estudio

#### 3.1 Visión general de LPWAN

Debido al gran crecimiento de las tecnologías de IoT, se puede encontrar un número creciente de aplicaciones prácticas en muchos campos (seguridad, seguimiento de activos, agricultura, medición inteligente, ciudades inteligentes, etc.); estas aplicaciones IoT tienen requisitos específicos como largo alcance, baja tasa de datos, bajo consumo de energía y bajo coste. Las tecnologías de radio de corto alcance como ZigBee, Bluetooth, etc., no están adaptadas el requerimiento de transmisión de largo alcance, mientras que las soluciones basadas en comunicaciones celulares (2G, 3G y 4G) pueden proporcionar una mayor cobertura, pero consumen una energía excesiva del dispositivo.

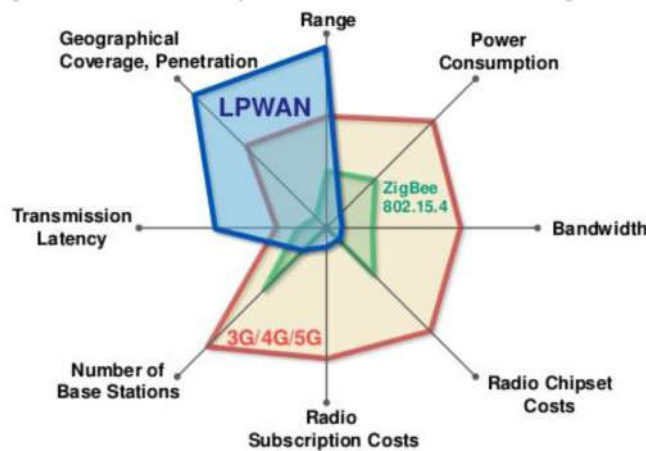


Figura 3. Características de las distintas tecnologías radio [37]

Por esto, los requisitos de las aplicaciones de IoT han impulsado el surgimiento de la tecnología de comunicación inalámbrica Low Power Area Network (LPWAN), término genérico para un grupo de tecnologías que hacen posible las comunicaciones de área amplia a bajo coste y menor consumo de potencia.

El objetivo de las redes LPWAN es proporcionar una red de baja potencia para dispositivos pequeños como sensores y medidores inteligentes. LPWAN está ganando cada vez más popularidad en el sector industrial y de investigación debido a sus características de comunicación de bajo consumo, largo alcance y bajo coste. Estas tecnologías proporcionan comunicación de largo alcance hasta 10–40 km en zonas rurales y 1–5 km en zonas urbanas. Además, son altamente eficiente en términos de energía (más de 10 años de vida útil de la batería) y económicas, el coste de un conjunto de chips de radio es inferior a 2€ y el coste operativo es de aproximadamente 1€ por dispositivo al año. En resumen, LPWAN es altamente adecuado para aplicaciones de IoT que solo necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos a larga distancia, mientras que las tecnologías de acceso como Bluetooth, Zigbee y Wi-Fi están orientando su explotación a aplicaciones más exigentes.

Se han propuesto muchas tecnologías LPWAN para gran variedad de aplicaciones, LoRa, SigFox y NB-IoT [13] están entre las más populares.

### 3.1.1 LoRa

LoRa, de Semtech Company, es una tecnología de capa física que modula la señal en la banda ISM usando técnicas propietarias de espectro ensanchado. Es la primera implementación de área amplia de bajo coste para uso comercial.

#### Capa física

- Utiliza espectro sin licencia de la banda ISM, 868 MHz en Europa, 915MHz en EEUU y 433MHz en Asia.
- Mediante la modulación CSS (Chirp Spread Spectrum Modulation), que negocia la tasa de datos para la sensibilidad dentro de un ancho de banda de canal fijado, proporciona comunicación bidireccional asíncrona, ésta propaga una señal de banda estrecha sobre un canal de ancho de banda más amplio.
- La señal resultante de esta modulación tiene niveles bajos de ruido, permitiendo mayor resistencia a las interferencias, además de ser difícil de interferir. LoRa utiliza CSS y GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) para evitar la interferencia de entrada/salida y, además, lograr que funcione hasta 25 dB por debajo del ruido.
- Utiliza 6 factores de ensanchado (SF1-SF6) para adaptar la velocidad de datos y el rango de compensación. Los factores más altos permiten rangos más altos, a expensas de velocidades de datos más bajas y viceversa. Además, sus estaciones base pueden recibir los mensajes transmitidos usando diferentes factores de forma simultánea [39].
- La tasa de datos de este estándar va de 300bps hasta 50kbps, dependiendo del factor de ensanchado y del ancho de banda. El tamaño máximo de payload de cada mensaje es 243bytes. Por ello, el ancho de banda requerido por LoRa puede ser flexible, de 7.8kHz a 500kHz.
- El rango de cobertura previsto en zonas urbanas está entre 2 y 5 km y unos 15 km en zonas suburbanas.

#### Protocolo de comunicación

LoRa Alliance estandarizó el protocolo de comunicación basado en LoRa, llamado LoRaWAN. LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema, mientras que LoRa define la capa física.

La red LoRaWAN aplica una técnica de modulación adaptativa con transceptor multicanal multi-módem en la estación base para recibir un número múltiple de mensajes desde los canales. Usando LoRaWAN, cada mensaje transmitido por un dispositivo final es recibido por todas las estaciones base en el rango. Al explotar esta recepción redundante, LoRaWAN mejora la tasa de mensajes recibidos. Sin embargo, esto requiere múltiples estaciones base en el rango de cobertura, lo que puede incrementar el coste del despliegue de la red.

El espectro ensanchado proporciona separación ortogonal entre las señales mediante el uso de un único factor de ensanchado (SF) para la señal individual. Este método proporciona ventajas en la gestión de la tasa de datos. La relación entre la tasa de bit de datos requerida con la tasa chirp y la tasa de símbolo en la técnica de modulación LoRa se define como sigue:



$$R_b = SF * \frac{1}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ bits / s} \quad R_b: \text{ tasa de datos; SF: factor ensanchado; BW: ancho de banda}$$

Ecuación 1. Tasa de bit en la modulación LoRa [12]

LoRaWAN utiliza la recepción múltiple del mismo mensaje por diferentes estaciones base para la localización de los dispositivos finales, para ello usa la técnica de localización basada en la diferencia de tiempo de llegada (TDOA), soportada gracias a la sincronización de tiempo de alta precisión entre las múltiples estaciones base. Esta recepción múltiple también evita el handover en la red LoRaWAN, es decir, si un dispositivo final está en movimiento, no se necesita cambio entre las estaciones base.

### Arquitectura de red

LoRaWAN usa arquitectura en estrella de largo alcance. En la siguiente figura se muestra un esquema de su arquitectura:

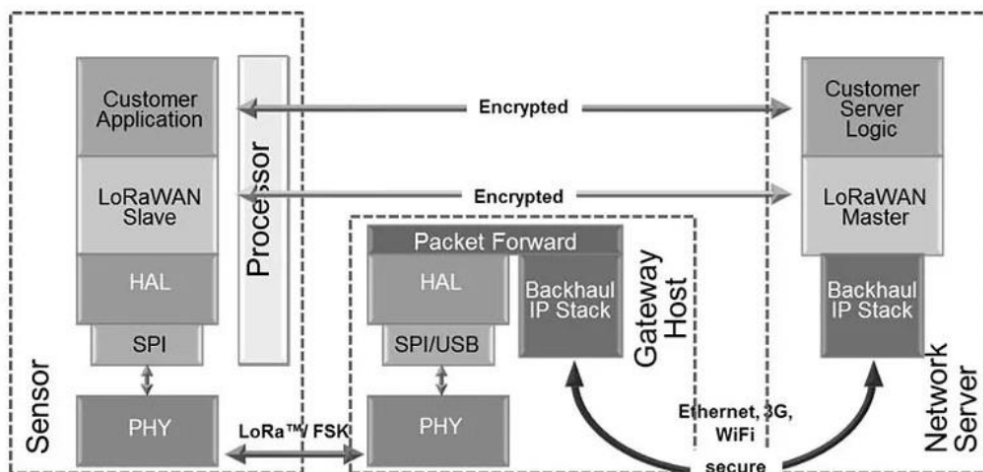


Figura 4. Arquitectura de la red LoRaWAN [42]

- Las puertas de enlace (gateways) se utilizan para retransmitir los mensajes entre los dispositivos finales y el núcleo central de red.
- Los nodos no están asociados con un gateway específico, los datos transmitidos por un nodo son habitualmente recibidos por múltiples gateways. Cada gateway reenviará el paquete recibido desde el nodo final al servidor de red (network server) basado en la nube a través de algún backhaul (celular, ethernet, satélite o WiFi).
- Los dispositivos finales (sensores y aplicaciones) se comunican con una o varias puertas de enlace a través de la comunicación LoRa de un solo salto, mientras que todas las puertas de enlace están conectadas al núcleo del servidor de red a través de conexiones IP estándar.
- El servidor de red tiene la inteligencia necesaria para filtrar los paquetes duplicados de diferentes puertas de enlace; verificar la seguridad; enviar ACK a las puertas de enlace y enviar el paquete al servidor de aplicaciones específico. Debido a que la red puede elegir la información con más calidad entre la transmitida por diferentes pasarelas, se elimina la necesidad de transferencia (hand-off) o de handover.

En caso de usar una red en forma de malla, el sistema puede aumentar el rango de comunicación y el tamaño de la celda de la red, a expensas de la duración de la batería del dispositivo.

### Protocolo MAC (Medium Access Control)

Los nodos finales en la red LoRaWAN se pueden dividir en tres clases de dispositivos diferentes de acuerdo con la compensación entre la latencia de comunicación del enlace descendente de la red y la vida útil de la batería. Se diseñaron tres protocolos MAC para estas tres clases de dispositivos:

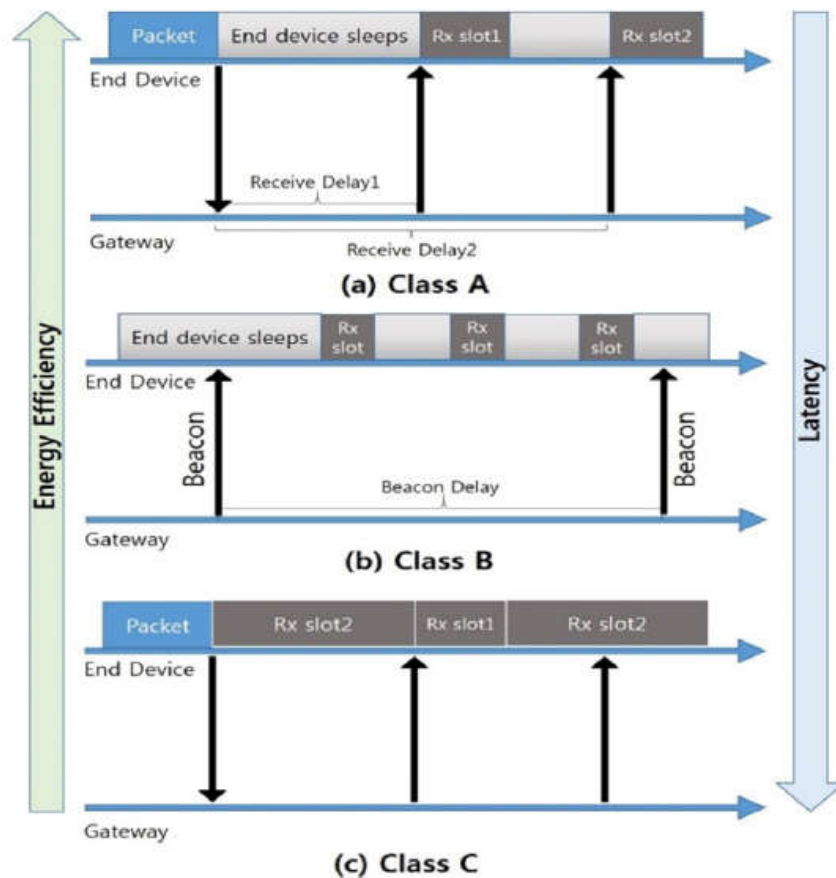


Figura 5. Las tres clases de dispositivos LoRa reciben tiempo de slot [20]

- Para los dispositivos finales de clase A, el nodo final envía un mensaje en sentido ascendente y abre 2 ventanas de recepción con retardos diferentes determinados de forma aleatoria (figura 7(a)). Este es el sistema de dispositivo final de menor consumo de potencia, para aplicaciones que solo requieren una comunicación corta de enlace descendente después de que el dispositivo final haya enviado un mensaje de enlace ascendente.

- Los dispositivos finales de clase B abren ventanas de recepción en tiempos programados, como se muestra en la figura 7(b). Para ello, la puerta de enlace envía una señalización (beacon) para sincronizar todos los dispositivos finales en la red. Cuando un dispositivo final recibe la señalización, puede abrir una breve ventana de recepción, llamada "ping slot", de manera predecible durante un slot de tiempo periódico; en caso contrario, la red pasará a entender que se trata de un dispositivo de clase A.

- Los dispositivos finales de clase C tienen latencia mínima en la comunicación de enlace descendente en comparación con las otras dos clases. Como se muestra en la figura 7(c), los dispositivos finales abren una ventana de recepción continua hasta el final de la transmisión, a expensas del excesivo consumo de energía. Se utilizan para aplicaciones con suficiente potencia disponible y no necesitan minimizar las ventanas de tiempo de recepción.

### 3.1.2 Sigfox

Sigfox es una tecnología LPWAN diseñada por una empresa francesa. Se trata de un operador de red LPWAN que ofrece una solución de conectividad IoT mediante la adopción de su propia tecnología patentada. Opera como una red de área amplia y proporciona conectividad sin implementar infraestructuras de red específicas para cada aplicación.

Los dispositivos que utilizan tecnología Sigfox no son de su exclusividad, cualquier fabricante puede ofrecerlos (como Arduino) y, por tanto, serán más económicos que los dispositivos de otras tecnologías LPWAN.

La potencia máxima a utilizar es 14 dBm (según los estándares del organismo regulador ETSI), este bajo consumo de los dispositivos permite extender la vida de la batería, así como crear una celda más densa en la red Sigfox que puede dar una cobertura media de 40km en áreas rurales y de 5km en áreas urbanas. Las distancias se pueden ampliar, ya que puede utilizar bases repetidoras para enviar los mensajes a áreas donde su red lo requiera.

La red de bases y antenas de Sigfox es independiente de cualquier operador, aunque puede utilizar infraestructura ya existente para su integración.

#### Capa física

- SigFox utiliza espectro sin licencia, en la banda de radio industrial, científica y médica (ISM) de espectro libre. Las frecuencias que utiliza son 868MHz en Europa, 915MHz en América y 433MHz en Asia.
- Despliega sus estaciones base equipadas con radio cognitiva definida por software y las conecta a los servidores utilizando una red IP.
- Los dispositivos finales se conectan a las estaciones base mediante modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying) en una portadora de ancho de banda ultra-estrecha.
- Al emplear la modulación UNB (Ultra Narrow Band), Sigfox utiliza un ancho de banda muy pequeño (192kHz) para realizar el intercambio de mensajes. Cada mensaje tiene una amplitud de 100Hz y la tasa de datos con la que se transmiten va de 100 a 600bps, dependiendo de la región.
- Utiliza ancho de banda estrecho y experimenta niveles de ruido muy bajos, esto supone consumo de energía muy bajo, una alta sensibilidad del receptor y un diseño de antena de bajo coste a expensas del rendimiento máximo.
- Sigfox utiliza la modulación D-BPSK en el enlace ascendente proporcionando una eficiencia espectral muy alta (1Hz=1bps). Al utilizar esta modulación, consigue una tecnología relativamente fácil de

implementar, costes bajos de los componentes y estaciones receptoras altamente sensibles (a 100bps, -142dBm y a 600bps, -134dBm) [43].

- En el enlace descendente utiliza GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) en una banda de 600Hz, por lo que el mensaje se transmitirá a 600bps y con una potencia de 500mW (27dBm). La comunicación de enlace descendente solo puede realizarse después de una comunicación de enlace ascendente.
- El número de mensajes de uplink está limitado a 140 mensajes por día y el payload es de 12 bytes. Sin embargo, el número de mensajes del downlink está limitado a 4 por día y el payload es de 8 bytes, por lo que no se admite el reconocimiento de todos los mensajes.
- Sin el soporte adecuado de reconocimiento, la confiabilidad de la comunicación de enlace ascendente se asegura utilizando la RFTDMA (Random Frequency and Time Division Multiple Access), así como la duplicación de la transmisión.
- Sigfox realiza el envío de paquetes pequeños en un canal aleatorio con un retraso aleatorio de entre 500 y 525ms, teniendo limitada su bidireccionalidad en comparación con otras tecnologías LPWAN. Este envío de información se realiza sin tener en cuenta si el canal está ocupado previamente.
- En Europa, la banda entre 868.180 MHz y 868.220 MHz se divide en 400 canales ortogonales de 100 Hz (40 canales están reservados) [38]. Como las estaciones base pueden recibir mensajes simultáneamente en todos los canales, el dispositivo final elige aleatoriamente un canal de frecuencia para transmitir, lo que simplifica el diseño del dispositivo y reduce su coste. La utilización de esta técnica aleatoria y la cantidad de canales disponibles para las transmisiones, con el corto tiempo de ocupación de los canales, hacen mínima la posibilidad de colisiones.

Cada mensaje del dispositivo final se transmite varias veces (tres de forma predeterminada) a través de diferentes canales de frecuencia.

La transmisión de enlace descendente se puede realizar de dos formas:

- Piggy-backing: los dispositivos finales están preparados para recibir el mensaje del enlace descendente, abriéndose una ventana fija de recepción después de cada transmisión de enlace ascendente. Esta ventana tiene unos valores fijos de retardo y duración. Mejora la eficiencia y disminuye el flujo de paquetes.

- Broadcasting: un nodo emisor envía información a multitud de nodos receptores de forma simultánea sin necesidad de reproducir el mensaje nodo a nodo. Esta técnica es posible en UNB, pero aún no está implementada.

### Protocolo MAC

Formato de la trama de acceso al medio (MAC) del enlace ascendente:



Figura 6. Trama MAC de uplink de Sigfox [44]

- El preámbulo (preamble) indica que es una trama de uplink.
- La trama de sincronización (frame sync.) se encarga de la sincronización de los dispositivos.
- El identificador de dispositivo final (end-device ID) es el identificador del objeto o sensor que se conecta a la red Sigfox.
- La carga útil de datos (payload) es la información que se quiere transmitir.
- La autenticación (auth.) permite identificar los dispositivos.
- El verificador (FCS) comprobará la integridad de la información.

En la siguiente figura se puede observar el formato del enlace descendente:

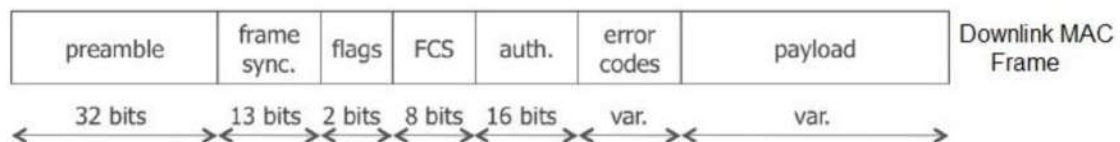


Figura 7. Trama MAC de downlink de Sigfox [44]

Los componentes preamble, frame sync, FCS, auth. y payload, son iguales que los de la trama de enlace ascendente, los demás:

- Flags son los de marcadores.
- Los códigos de error (error codes) indican si ha sucedido un error y de qué tipo.

## Arquitectura de red

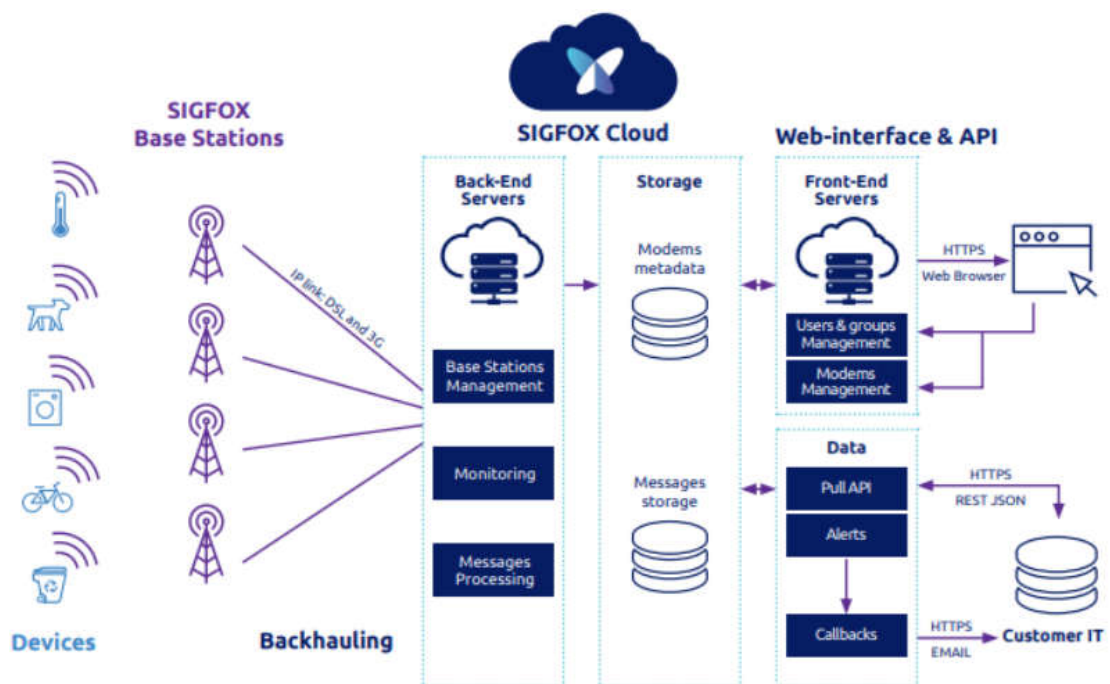


Figura 8. Arquitectura de red Sigfox [45]

Sigfox utiliza una topología en estrella con un funcionamiento bastante simple, millones de objetos emiten datos a las estaciones que tiene la red, estas estaciones reciben los datos (backhuling) y los transmiten a la nube Sigfox. Esta conexión entre las estaciones y la nube se puede realizar vía Ethernet (IP/ADSL) o vía radioenlace satélite o 3G/4G.

Desde su nube, Sigfox provee a los servidores de los clientes sus datos, así, los clientes pueden acceder a sus mensajes o datos directamente.

El uso de UNB reduce las posibles colisiones que pueden producir interferencias en la transmisión de la señal, por lo que el sistema será más resistente a la misma. Esta característica de robustez hace que Sigfox tenga una QoS alta, teniendo una gran escalabilidad que permite la interconectividad entre múltiples objetos.

### 3.2 Estudio de la tecnología NB-IoT

#### 3.2.1 Evolución de los estándares 3GPP para MTC/IoT

3GPP es el organismo de estandarización que especifica los sistemas de comunicaciones móviles LTE/LTE-Advanced, así como 3G UTRA y 2G GSM. Los estándares 3GPP están estructurados en Releases (Rel).

La versión inicial de los estándares LTE Machine Type Communication (MTC) se introdujo en la Rel-8, basada en la Categoría 1 (Cat1) de UE (User Equipment), la de menor capacidad. Éstos fueron evolucionando como se muestra en la siguiente tabla:

	Rel-8	Rel-12	Rel-13	Rel-13
	Cat1	Cat0	CatM1	CatNB1 (CatM2)
<b>Pico comunicación descendente</b>	10 Mbps	1 Mbps	1 Mbps	200 kbps
<b>Pico comunicación ascendente</b>	5Mbps	1 Mbps	1 Mbps	144 kbps
<b>Número antenas</b>	2	1	1	1
<b>Modo Dúplex</b>	Full dúplex	Half dúplex	Half dúplex	Half dúplex
<b>Ancho de banda UE</b>	20MHz	20MHz	1.4 MHz	180 kHz
<b>Pot. transmisión UE</b>	23dBm	23dBm	20dBm	23 dBm
<b>Complejidad</b>	100%	50%	20%	15%
<b>Casos de uso</b>	Servicio de voz para emergencia en ascensores, gestión de red inteligente, rastreo de mascotas, anciano, niños.	Solución previa a CatM. Reemplaza a Cat1, aunque no se puede usar en casos de uso de voz.	Monitorización de medio ambiente, rastreo de vehículos.	Mediciones inteligentes, edificios inteligentes, automatización del hogar.

Tabla 7. Evolución de las categorías UE para MTC/IoT

#### 3.2.2 Arquitectura de red

NB-IoT utiliza la misma arquitectura que la red LTE con cierta optimización para admitir los requisitos masivos de IoT. Para enviar datos a una aplicación, se definieron dos optimizaciones para el Internet celular de las cosas (CIoT) en el Evolved Packet System (EPS), la optimización en el plano de usuario de CIoT EPS y la optimización en el plano de control de CIoT EPS.

En la figura 9 se observa la red para la transmisión y recepción de datos NB-IoT. En rojo, la optimización del plano de control y en azul la de usuario.

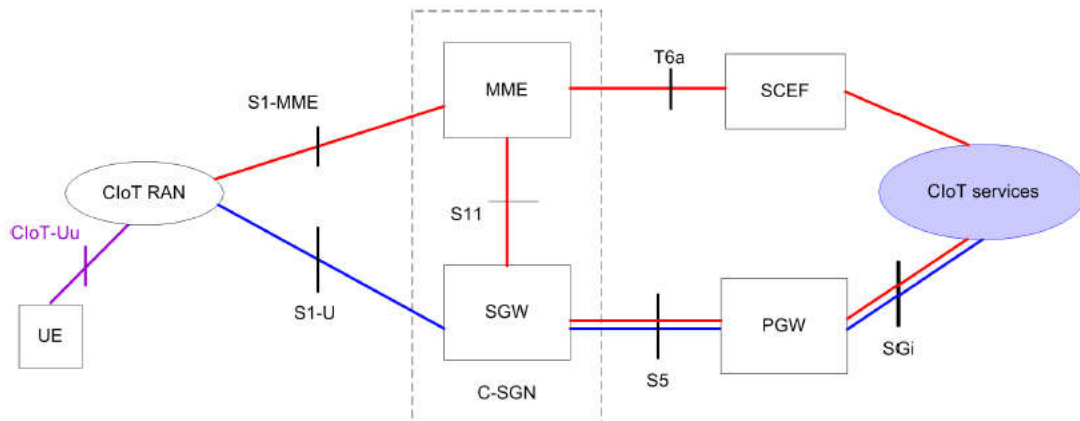


Figura 9. Arquitectura de red de datos NB-IoT [49]

» En la optimización de Clot EPS del plano de control:

- Los datos del enlace ascendente se transfieren desde el eNB (Clot RAN) a la MME (Mobility Management Entity), desde allí, pueden transferirse a través del Serving Gateway (SGW) al Packet Data Network Gateway (PGW), o al Service Capability Exposure Function (SCEF), esto último solo es posible para paquetes de datos no IP. Desde estos nodos, finalmente se envían al servidor de aplicaciones (Clot services).
- Los datos del enlace descendente se transmiten a través de los mismos caminos en la dirección inversa.

El SCEF es un nuevo nodo diseñado para datos de tipo máquina, que se utiliza para la entrega de datos que no son IP sobre el plano de control, y proporciona una interfaz abstracta para los servicios de red (autenticación y autorización, descubrimiento y acceso a las capacidades de red).

» En la optimización del plano de usuario, los datos se transfieren de forma convencional, es decir, a través de los portadores de radio vía SGW y PGW al servidor de aplicaciones. Esto, genera cierta sobrecarga en la creación de la conexión, aunque facilita una secuencia de paquetes de datos para enviar. Esta ruta es compatible con la entrega de datos tanto IP como no IP.

La transmisión de pequeños datos se basa en una arquitectura simplificada orientada a transportar estos pequeños bloques de información sobre mensajes de señalización con el número de red o Non Access Stratum (NAS).

Se usa un nodo dedicado del núcleo de red para un perfil Clot (terminología 3GPP para IoT), proporcionando funciones combinadas de plano de control y de usuario, por ejemplo, agregando funciones que tradicionalmente residían en el MME y en el SGW, y en algunas instancias de PGW en una nueva entidad lógica llamada C-SGN (Clot Serving Gateway Node).

El plano de control consiste en protocolos que gestionan las portadoras de acceso y la conexión entre el UE y la red.

- La capa más alta del plano de control se denomina capa de no acceso o Non-Access Stratum (NAS) y realiza el intercambio de señalización entre

el UE y el núcleo de red (EPC), pasando de forma transparente a través de la red radio. Es el responsable de la autenticación, control de seguridad, gestión de movilidad y gestión de portadoras.

- La capa de acceso o Access Stratum (AS) es el nivel funcional por debajo de NAS y, en el plano de control, consiste en el protocolo de control de recursos radio (RRC).

RRC configura los planos de control y de usuario de acuerdo al estado de la red. Hay dos estados principales a nivel RRC: inactivo (RRC\_Idle) y conectado (RRC\_Connected). La entidad RRC controla la conmutación entre estos estados:

- En estado RRC\_Idle, la red sabe que el UE está presente en la red y que puede ser alcanzado en caso de una llamada o conexión entrante.
- En estado RRC\_Connected, el UE tiene una conexión radio activa con el eNodeB, la red sabe la posición del UE a nivel de celda y el UE puede transmitir y recibir datos.

Cuando no hay tráfico se libera la conexión, pasando de RRC\_Connected a RRC\_Idle, para ahorrar batería y recursos radio, además, existen los procedimientos de suspensión y recuperación que reducen la sobrecarga requerida para la transición del estado del UE de inactivo a conectado, reduciendo los mensajes de señalización.

### 3.2.3 Bandas de frecuencia

3GPP ha definido un conjunto de bandas de frecuencia para las que se puede usar NB-IoT. 3GPP TS 36.101 de Rel-13 proporciona la lista de las bandas admitidas, que son: 1, 2, 3, 5, 8, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 66; la Rel-14 agregó las bandas: 11, 25, 31 y 70; y, posteriormente, la Rel-15 de 3GPP agregó las bandas: 4, 14, 71, 72, 73, 74 y 85.

### 3.2.4 Capa física

NB-IoT proporciona acceso a servicios de red usando una capa física [5] optimizada para bajo consumo y coste. El ancho de banda del canal completo es de 180 kHz y la separación entre subportadoras es de 15kHz, para el enlace descendente (downlink) y de 15kHz o 3.75kHz para el ascendente (uplink). Además, el esquema de transmisión usa un único bloque de recursos (RB).

#### **Esquema de transmisión de enlace descendente**

El ancho de banda del enlace descendente del sistema NB-IoT es de 180kHz y su esquema de transmisión se basa en OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), con ancho de subportadora de 15kHz con prefijo cíclico (CP) normal, igual que LTE [14].

Las duraciones de slot, subtrama y trama son idénticas a las de LTE, 0.5ms, 1ms y 10ms, respectivamente. Cada trama está compuesta por 10 subtramas y el número de subportadoras dentro de un RB es 12 (cada uno de los símbolos OFDMA consta de 12 subportadoras).



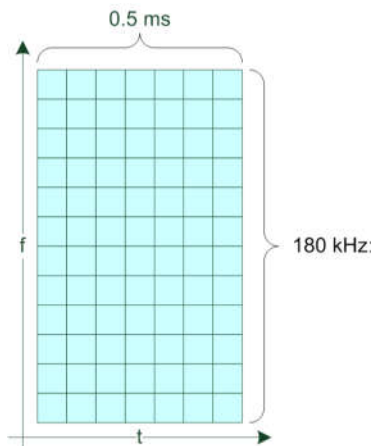


Figura 10: Grid de recursos para un slot [49].

En esencia, una portadora NB-IoT usa un LTE RB en el dominio de la frecuencia (es decir, 12 subportadoras de 15kHz) para un total de 180 kHz y siete símbolos OFDMA se agrupan en un slot. La reutilización de la misma numerología OFDMA que LTE garantiza un buen rendimiento en la coexistencia con LTE en el downlink, de forma la ortogonalidad entre el NB-IoT PRB (bloque de recursos físicos) y los LTE RB se conserva.

Un elemento de recurso (RE) se define como una subportadora en un símbolo OFDMA y se indica en la figura 10 con un cuadrado. Cada uno de estos RE lleva un valor complejo con valores de acuerdo con el esquema de modulación.

Estos slots se unen en subtramas y tramas de radio igual que para LTE:

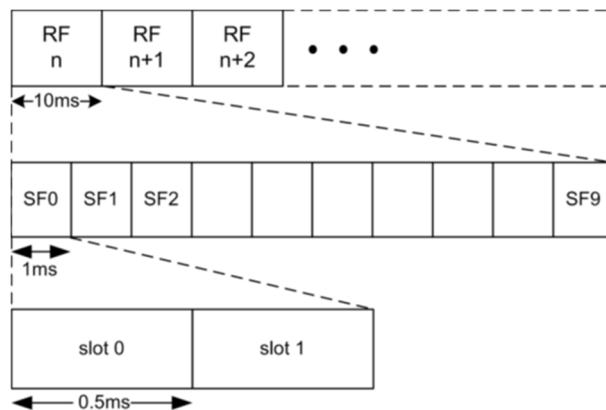


Figura 11. Estructura de trama NB-IoT para subportadora de 15kHz [49]

Hay 1024 tramas de radio (RF) repetidas cíclicamente, cada una de 10ms. Cada trama se divide en 10 subtramas (SF), compuestas por 2 slots cada una. También se define el concepto de hipertramas, que cuenta el número de períodos de tramas del sistema, es decir, se incrementa cada vez que se ajusta el número de tramas del sistema. Es un contador de 10 bits, por lo que el período de hipertrama abarca 1024 períodos de trama del sistema, que corresponden a un intervalo de tiempo de casi 3 horas.

### Esquema de transmisión de enlace ascendente

El ancho de banda de transmisión del enlace ascendente de NB-IoT es también 180kHz. Éste se basa en SC-FDMA (Single-Carrier Frecuencia Division Multiple

Access) y soporta dos modos de operación, multitono y de tono único [14], siendo el eNB quien decida cuál de los utilizar.

La transmisión multitono utiliza, igual que LTE, un espaciado de subportadora de 15kHz y un slot de 0,5ms.

La transmisión de tono único admite dos numerologías, 15kHz y 3.75kHz. La de 15kHz es idéntica a LTE y la de 3,75kHz utiliza una duración de slot de 2ms, su funcionalidad es proporcionar capacidad en escenarios con intensidad de señal limitada. En este último caso, una trama contiene 5 slots y cada slot, siete símbolos y reserva intervalo de guarda entre cada slot para minimizar el conflicto entre símbolos NB-IoT y LTE.

La transmisión multitono permite agrupar conjuntos de 3,6 o 12 subportadoras, por ello, la duración mínima de las unidades de recursos usadas en la planificación depende del número de subportadoras asignadas y del modo de operación, yendo desde 1 ms en transmisión multitono con 12 subportadoras, a 32ms en transmisión de tono único de 3.75kHz.

El grid de recursos para uplink es el mismo que para la downlink cuando se aplica el espaciado de subportadora de 15kHz (figura 11), para 3.75kHz el grid de recursos para un slot tiene una estructura modificada, 48 subportadoras para un ancho de banda de 180kHz:

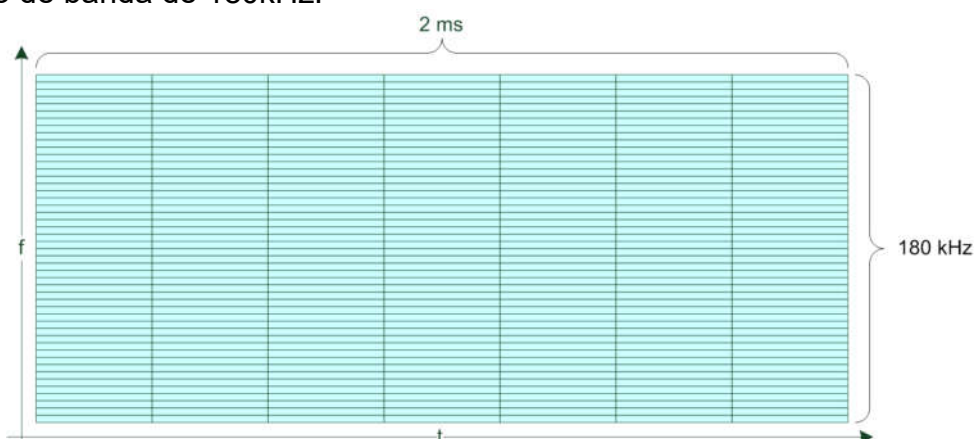


Figura 12. Grid de recursos para espaciado de subportadora de 3.75 kHz [49]

También hay 7 símbolos OFDM dentro de un slot. De acuerdo con los principios de OFDM, la duración del símbolo para el espaciado de subportadora de 3.75kHz tiene 4 veces la duración de 15kHz, la longitud de slot es de 2ms.

Parámetros	Downlink	Uplink
Modulación	OFDMA (igual que LTE)	SC-FDMA (Igual que LTE)
Espaciado subportadora	15 kHz (igual que LTE)	15 kHz o 3.75 kHz
Tamaño símbolo	Igual que LTE	Igual que LTE
Duración de slot	Igual que LTE	Igual que LTE
Ancho de banda del sistema	180 kHz	180kHz
Número de subportadoras	12 (180 kHz en total)	12 (180 kHz en total)

Tabla 8. Resumen parámetros de uplink y downlink

### 3.2.4.1 Enlace descendente (Downlink)

Con el objetivo de ancho de banda de transmisión de downlink de 180 kHz y el requisito de mejora de cobertura, NB-IoT reduce el canal físico y rediseña parte de este canal, la señal de sincronización y la señal de referencia.

En el enlace descendente NB-IoT encontramos 3 canales físicos:

- NPBCH, Canal físico de transmisión de banda estrecha: a través de éste se transmite la información MIB (Bloque de información maestra).
- NPDCCH, Canal físico de control de enlace descendente de banda estrecha: controla la transferencia de datos entre UE y eNB (eNodeB).
- NPDSCH, Canal físico compartido de enlace descendente de banda estrecha: a través de éste se transmiten el resto de información de señalización y los datos.

Y 2 señales físicas:

- NPSS y NSSS: Señales de sincronización primaria y secundaria de banda estrecha.
- NRS: Señal de referencia de banda estrecha.

El canal físico de multidifusión PMCH de LTE no está incluido, porque no hay servicio de MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) para NB-IoT.

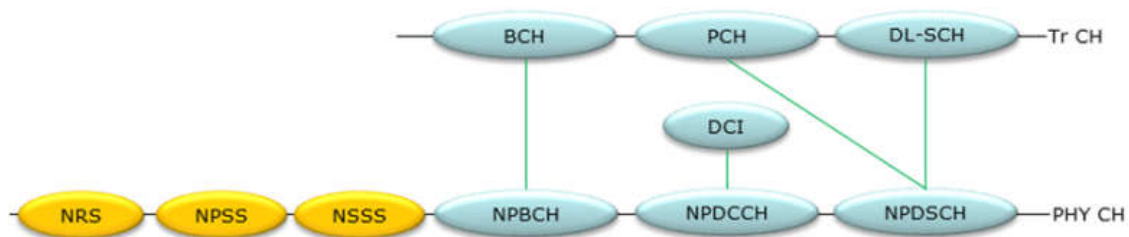


Figura 13. Mapeo de los canales de transporte (Tr CH) a los canales físicos (PHY CH) [50]

Los canales físicos de downlink están siempre modulados en QPSK, admitiendo la operación con uno o dos puertos de antena (AP0 y AP1), para este último caso, se aplica SFBC (Space Frequency Block Coding). Una vez seleccionado, se aplica el mismo esquema de transmisión a los 3 canales.

Igual que en LTE, cada celda tiene una ID de celda física (PCI) asignada, la ID de celda física de banda estrecha (NCellID). Se definen un total de 504 valores diferentes para NCellID, el valor lo proporciona la señal NSSS.

NB-IoT introduce un mecanismo de retransmisión en el canal físico del downlink y mejora el umbral de demodulación a través de la ganancia de diversidad y la ganancia combinada de la retransmisión, esto mejora la cobertura del enlace descendente.

A diferencia de LTE, los canales físicos y señales NB-IoT se multiplexan principalmente en el tiempo, la Figura 15 ilustra cómo se asignan en las subtramas NB-IoT. Cada subtrama se extiende sobre un RB en el dominio de la frecuencia y 1 ms en el dominio de tiempo.

Trama par	Número de subtrama									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	NPBCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPSS	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NSSS
Trama impar	Número de subtrama									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	NPBCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPSS	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH	NPDCCH o NPDSCH

Figura 14. Multiplexación en el tiempo de señales y canales físicos de downlink NB-IoT [51]

## NRS

La señal de referencia de banda estrecha (NRS) se transmite en todas las subtramas que se usan para broadcast o transmisión de downlink (NPDCCH y NPDSCH), sin importar si los datos se transmiten realmente o no.

Dependiendo del esquema de transmisión, NRS se transmite en un puerto de antena o en dos. Sus valores se crean como el CRS (Cell Specific Reference Signal) LTE, con el NCellID.

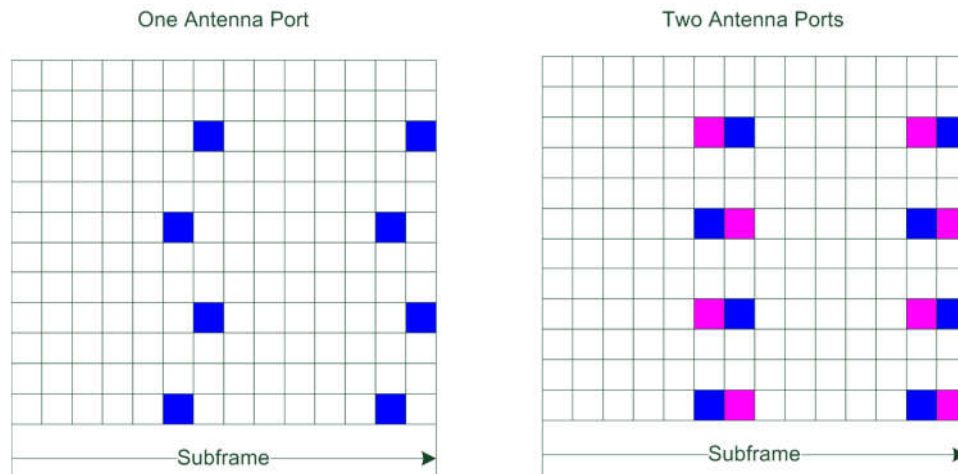


Figura 15. Mapeo básico de señales de referencia a los elementos de recursos [49]

En la figura 15, en azul se muestra el NRS transmitido en el puerto de antena 0, en magenta, NRS transmitido en el puerto de antena 1.

NCellID desplaza cíclicamente el mapeo NRS en el rango de frecuencia.

Con la estructura del NRS no hay superposición con LTE CRS, pero, debe tenerse en cuenta para la correspondencia de la velocidad y el mapeo. Las transmisiones de downlink no deben usar estos elementos de recurso.

NcellID puede ser el mismo que el PCI para la celda LTE. Esto se indica en el parámetro `operationMode` en MIB-NB, si éste se establece en verdadero, son iguales y el UE puede asumir que el número de puertos de antena es el mismo que en la celda LTE. Si se establece en falso, el UE no puede realizar estas suposiciones.

## NPSS y NSSS

Para una primera sincronización en trama y subtrama y para determinar el NCellID, se reutilizan los conceptos LTE de señal de sincronización primaria (PSS) y secundaria (SSS), que para NB-IoT se denominan NPSS y NSSS.

Un NB-IoT UE utiliza NPSS y NSSS para realizar la búsqueda de celda y la detección de la identidad de celda. Dado que las secuencias de sincronización de LTE ocupan seis PRB, no pueden reutilizarse para NB-IoT, por lo que introduce este nuevo diseño.

**NPSS** se transmite en la subtrama #5 dentro de cada trama de 10 ms, utilizando los últimos 11 símbolos OFDM en la subtrama. Su detección es una de las operaciones computacionales más exigentes desde la perspectiva del UE, para permitir una implementación eficiente de esta detección, NB-IoT utiliza una secuencia jerárquica. Para cada uno de los 11 símbolos OFDM de NPSS se transmite  $p$  o  $-p$ , donde  $p$  es la secuencia base generada según una secuencia de Zadoff-Chu (ZC) de longitud 11 con índice raíz 5 [14]. Cada una de las secuencias ZC de longitud 11 se asigna a las 11 subportadoras más bajas dentro de la PRB NB-IoT.

Esta secuencia es fija y por lo tanto no contiene información sobre la célula. Al transmitirse en la subtrama #5 de cada trama, su recepción permite al UE determinar el límite de trama.

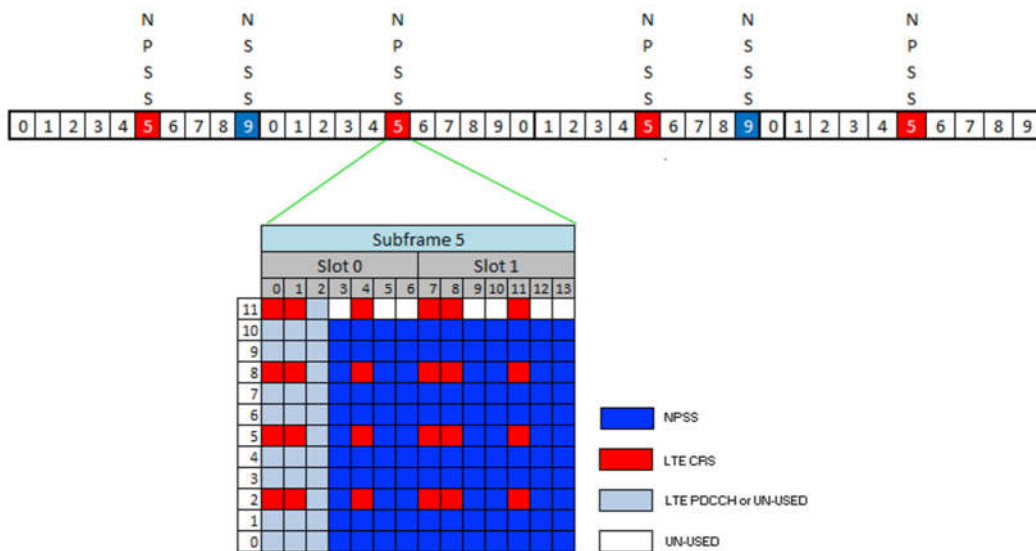


Figura 16. Mapeo NPSS [50]

La mayor diferencia entre PSS y NPSS reside en la asignación de recursos (mapeo RE). En LTE, se puede tener 6 PRB (72 RE) en un solo símbolo OFDM para ubicar una secuencia compuesta de 62 símbolos, pero en NB-IoT solo se tiene un PRB (12 RE) en el símbolo OFDM, la cantidad de datos que se puede ubicar en un símbolo OFDM es pequeña. Como con una cantidad pequeña de datos sería difícil lograr una buena correlación, necesaria para la detección de NPSS, se utilizan múltiples símbolos OFDM (11) para ubicar la señal de sincronización; ésta es lo suficientemente larga para lograr una buena correlación. Básicamente, se utiliza todo un PRB para llevar el NPSS. Además, la subtrama que lleva el NPSS es un poco diferente a la de LTE.

**NSSS** tiene una periodicidad de 20 ms y se transmite en la subtrama #9 de las tramas pares, también utilizando los últimos 11 símbolos OFDM que consisten en 132 elementos de recursos. En el caso de LTE, SSS se transmite en cada trama, igual que PSS.

NSSS es una secuencia en el dominio de la frecuencia de longitud 132, con cada elemento asignado a un RE, que se genera mediante la multiplicación de elementos entre una secuencia ZC en el dominio de la frecuencia de longitud 131 y una secuencia de aleatorización binaria [14]. La raíz de la secuencia ZC y la secuencia de aleatorización binaria están determinadas por NCellID. El desplazamiento cíclico de la secuencia ZC se determina además por el número de trama. Al igual que en LTE, se definen 504 valores PCI. Las características de SSS y NSSS difieren ampliamente, además de que el NPSS se basa en la secuencia ZC y SSS no, otra gran diferencia es el mapeo de elementos de recursos y el patrón de transmisión.

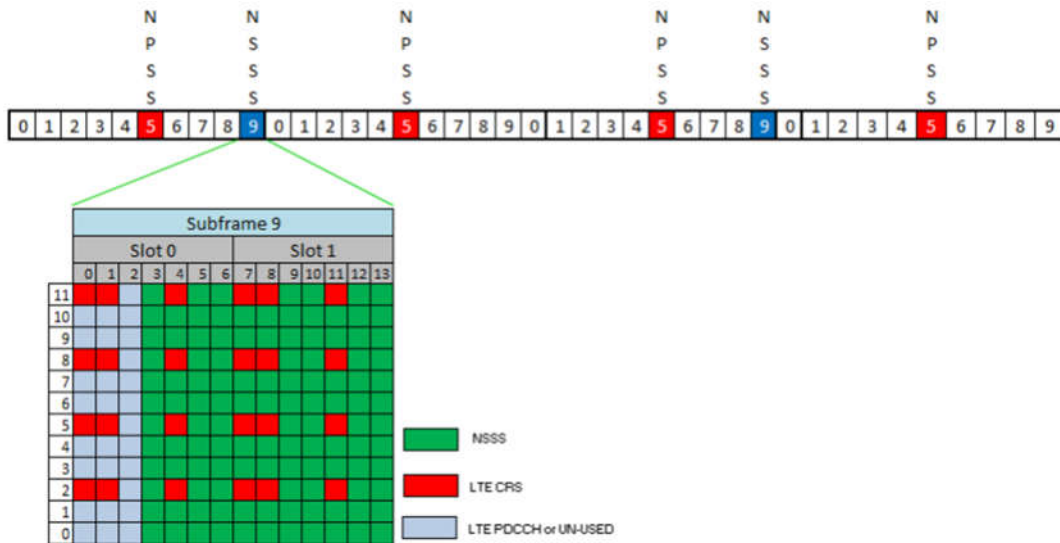


Figura 17. Mapeo NSSS [50]

## NPBCH

NPBCH es el canal que se utiliza para transportar el bloque de información maestra (MIB), que proporciona información esencial para que el UE funcione en la red NB-IoT. NPBCH utiliza un intervalo de tiempo de transmisión (TTI) de 640 ms, pero dentro del TTI solo se usa la subtrama #0 de cada trama, se transmite en la SF#0 exceptuando los 3 símbolos OFDM iniciales.

El proceso global de codificación de canales es casi igual al LTE, las diferencias son la longitud del bit de entrada/salida de cada proceso de codificación de canal y, por supuesto, el mapeo de elementos de recursos y el ciclo/subtrama de transmisión serán drásticamente diferentes de los LTE.

Características del canal NPBCH:

- Transporta el MIB, que contiene 34 bits de información después de agregar CR, con el TBCC (tail biting convolutional codes) resulta en 1600 bits en la capa física.
- El MIB-NB se modula en QPSK, que puede transportar 2 bits en cada símbolo, requiriendo 800 símbolos o RE para transmitir un MIB entero.
- Un período de transmisión de MIB es de aproximadamente 640 ms, es decir, 64 tramas.
- Una subtrama NB-IoT puede utilizar 100 RE para NPBCH de un total de 168 (en un bloque de recursos de una SF), los otros se utilizan para señales de referencia, por lo que para que MIB pueda transmitir 800 RE,

se requieren 8 subtramas. Los datos de cada subtrama relacionados con NPBCH se denominan subbloque de código (CSB).

- Cada subbloque se repite 8 veces y se transmite en cada subtrama #0 de cada trama excepto los 3 símbolos OFDM iniciales.

La información que se proporciona en el MIB es la siguiente:

- Los 4 bits más significativos (MSB) indican el número de trama del sistema (SFN), los restantes bits menos significativos (LSB) se derivan implícitamente del inicio MIB-NB.
- Los 2 bits LSB indican el número de hipertrama.
- 4 bits para el scheduling y tamaño SIB1-NB.
- 5 bits que indican el valor de la etiqueta de información del sistema.
- 1 bit que indica si se aplica restricción de clase de acceso.
- 7 bits que indican el modo de operación y sus valores específicos.
- 11 bits de reserva para futuras ampliaciones.

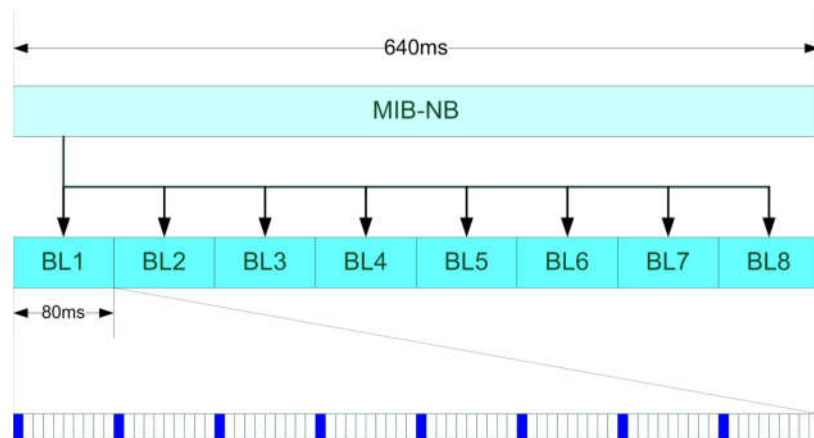


Figura 18. Mapeo NPBCH a las subtramas [49]

El MIB-NB se divide en 8 bloques. El primer bloque se transmite en la primera subtrama (SF#0) y se repite en la SF#0 de las 7 tramas consecutivas siguientes. Se realiza el mismo procedimiento para el bloque 2 (BL2), y así hasta que se transmite todo el MIB. Al utilizar la SF#0, se evita que NPBCH colisione con una posible transmisión de MBSFN de LTE.

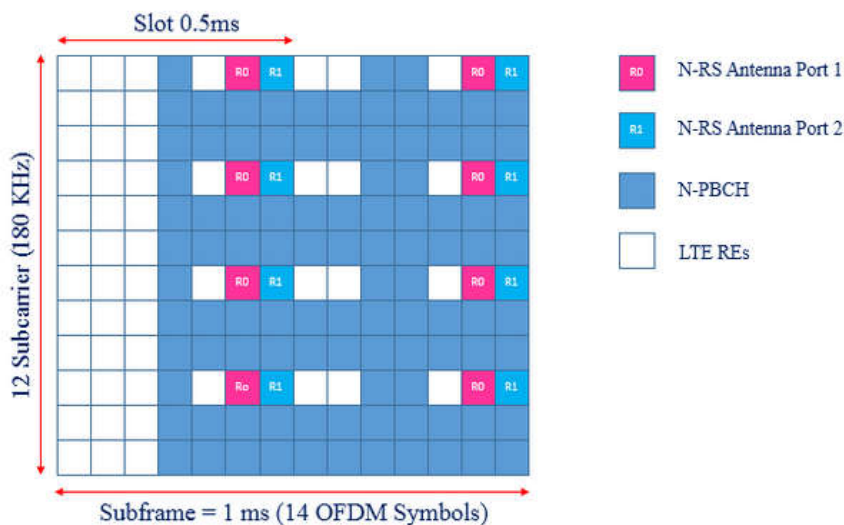


Figura 19. Mapeo de NPBCH en un bloque de recursos [49]

NPBCH utiliza la modulación QPSK y, por lo tanto, pueden transportarse 200 bits codificados en una subtrama NPBCH. Como ya se indicó, el NPBCH solo se transmitirá en la SF#0. El tamaño del bloque de transporte del NPBCH es de 34 bits, y a éste se le adjunta un CRC de 16 bits, lo que lo convierte en 50 bits que se codifican utilizando LTE Tail Bit Convolution Coding (LTE TBCC) con un ajuste de tasa para generar 1600 bits codificados. Los bits codificados se segmentan en ocho subbloques de código (CSB), cada uno con una longitud de 200 bits que se mapean a 100 símbolos QPSK.

Los símbolos se asignan alrededor del NRS y el LTE CRS, donde siempre se supone que se definen dos puertos de antena para NRS y 4 para CRS. Este supuesto es necesario, porque el UE obtiene la información del puerto de la antena real solo al leer el MIB-NB. La ubicación de la señal de referencia en el rango de frecuencia viene dada por el NCellID, proporcionado por el NSSS. Aunque el NCellID puede ser diferente al PCI, su rango está restringido de modo que apunta a las mismas ubicaciones de frecuencia, por lo tanto, el cambio cíclico de CRS en el rango de frecuencia es conocido por el UE. Nuevamente, los primeros 3 símbolos OFDM se omiten para evitar un posible conflicto con el canal de control de LTE.

Cada subtrama NPBCH es autodecodificable, pero todas las subtramas NPBCH también pueden decodificarse conjuntamente. Para ciertos NB-IoT UE con buena cobertura, una sola transmisión de un CSB sería suficiente para decodificar correctamente la información del NPBCH, sin embargo, los UE con poca cobertura pueden necesitar que el NPBCH sea repetitivo.

### **NPDCCH**

NPDCCH es un canal de control, indica para qué UE hay datos en el NPDSCH, dónde encontrarlos y con qué frecuencia se repiten; también proporciona las concesiones de uplink (mostrando los recursos que el UE utilizará para la transmisión de datos en el uplink) e informa al UE de la asignación de recursos del PCH (Paging Channel) y del DLSCCH (Downlink Shared Channel).

NPDCCH transporta:

- Información de scheduling para los canales de datos tanto del enlace descendente como del ascendente.
- La información de acuse de recibo de HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) para el canal de datos de uplink.
- El scheduling grant asignado al UE para la transmisión en el uplink.
- La respuesta de acceso aleatorio (RAR).

En el mecanismo de asignación de recursos, la parte más importante es el DCI (indicador de control de enlace descendente), se trata de un bloque lógico que transporta datos para NPDSCH o NPUSCH.

En cada subtrama, se definen dos elementos de canal de control de banda estrecha (NCCE), NCCE0 y NCCE1. El NCCE es la unidad básica de bloque físico en NPDCCH, donde se alojan los datos DCI. En función de esto, NPDCCH divide su área en dos subbloques llamados NCCE0 y NCCE1, surgiendo dos tipos diferentes de formato NPDCCH:

- El formato NPDCCH 0 toma solo una NCCE, por tanto, dos de ellos se pueden transmitir dentro de una subtrama.
- El formato NPDCCH 1 toma los dos NCCE.



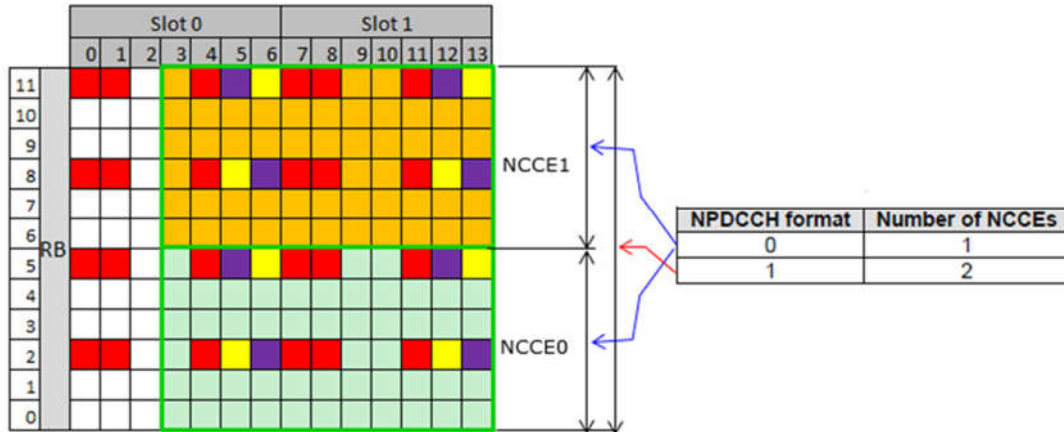


Figura 20. Elementos de recursos utilizados por NPDCCH [50]

Para detectar si hay datos en NPDSCH para el UE o cualquier concesión de uplink para NPUSCH, el UE debe monitorear varias regiones dentro de las subtramas del downlink. La red no notifica sobre las regiones que debe supervisar el UE y, por tanto, necesita monitorear todas las regiones que están permitidas para NPDCCH y decodificar la información en base a prueba y error. Sin embargo, hay un conjunto de regiones predefinidas en las que se puede asignar un PDCCH que son las que realmente monitorea. Estos conjuntos de regiones, para una complejidad de decodificación razonable, se denominan espacio de búsqueda NPDCCH y son los siguientes:

- Common Type-1, utilizado por NPDCCH para mensaje paging.
- Common Type-2, utilizado por NPDCCH para acceso aleatorio (RAR).
- Espacio de búsqueda específico de UE.

Cada NPDCCH puede repetirse varias veces con un límite superior configurado por el RRC. Además, el RRC proporciona el espacio de búsqueda común de Tipo 2 y el específico de UE, mientras que el común de Tipo 1 viene dado por las subtramas de oportunidad de paging.

Se asignan diferentes identificadores temporales de red de radio (RNTI) a cada UE, para acceso aleatorio (RA-RNTI), para localización (P-RNTI) y un identificador específico de UE (CRNTI) proporcionado en el procedimiento de RAR. Estos identificadores se indican implícitamente en la CRC (verificación de redundancia cíclica) del NPDCCH. Por lo tanto, el UE debe buscar en su espacio de búsqueda ese RNTI y, si lo encuentra, decodifica el NPDCCH.

A diferencia de LTE, en la Rel-13 para NB-IoT, se definen solo tres tipos de DCI que se muestran en la siguiente tabla:

Formato DCI	Longitud de bit (tamaño)	Propósito/uso
N0	23	Concesión uplink (NPUSCH scheduling)
N1	23	Scheduling downlink (scheduling HPDSCH) RACH iniciado por orden PDCCH
N2	15	Paging e indicación directa

Tabla 9. Formatos DCI [50]

Cuando el UE recibe el NPDCCH, puede distinguir los diferentes formatos de la siguiente manera:

- El formato DCI N2 se indica implícitamente en la forma en que el CRC se mezcla con el P-RNTI.
- Si el CRC está codificado con el C-RNTI, entonces el primer bit en el mensaje indica si está contenido el formato DCI N0 o N1.
- En el caso de que el CRC esté codificado con el RA-RNTI, el contenido es un formato DCI N1 restringido que incluye solo los campos necesarios para la respuesta del RACH.

Incluido en los formatos DCI N0 y N1 está el retardo de scheduling, es decir, el tiempo entre el final de NPDCCH y el inicio de NPDSCH o el inicio de NPUSCH. Este retraso es de al menos 5 subtramas para el NPDSCH y 8 para el NPUSCH. Para la transmisión de enlace descendente a través del formato DCI N2, el retardo de scheduling se fija a 10 subtramas.

### **NPDSCH**

NPDSCH es un canal dedicado de transporte, transporta el DL-SCH con datos de las capas superiores, así como el Paging Channel (PCH), información del sistema y el mensaje RAR para los NB-IoT UE.

Una subtrama NPDSCH tiene la misma estructura que el NPDCCH que se muestra en la figura 20.

Para reducir la complejidad del UE, todos los canales de downlink utilizan el código convolucional LTE TBCC [15]. Además, el tamaño del bloque de transporte (TBS) máximo de NPDSCH es de 680 bits, mientras que LTE admite un TBS máximo superior a 70.000 bits.

NB-IoT utiliza NRS para proporcionar una referencia de fase para la demodulación de los canales downlink. Las NRS se multiplexan con símbolos de información en subtramas que contienen NPBCH, NPDCCH y NPDSCH, utilizando ocho RE por subtrama por puerto de antena.

Para el downlink no hay acuse de recibo automático a una transmisión, el eNB lo indica en la DCI, que también indica la temporización y la subportadora asociada, y el UE transmite el acuse de recibo utilizando el formato NPUSCH 2.

Existe soporte de portadora múltiple, lo que significa que se puede usar otra portadora cuando el UE está en el estado conectado. En el estado inactivo, el UE se instala en la portadora NB-IoT desde la que recibió las señales de sincronización y la información de transmisión, es decir, la portadora de anclaje. Espera allí para buscar o iniciar el acceso para datos o señalización originados en el móvil, ambos transmitiendo un preámbulo en la portadora uplink asociada proporcionada en SIB2-NB.

SIB1-NB se transmite a través del NPDSCH, tiene un período de 256 tramas y se repite 4, 8 o 16 veces. El TBS y el número de repeticiones se indican en el MIB-NB, definiéndose 4 tamaños de bloque de transporte, 208, 328, 440 y 680 bits. La trama en la que comienza el SIB1-NB está determinada por el número de repeticiones y el NCellID. La subtrama #4 se utiliza para SIB1-NB en todas las tramas que transmiten SIB1-NB. Como los otros parámetros de transmisión también son fijos, no hay ninguna indicación asociada en el canal de control.

El contenido de SIB1-NB solo se puede cambiar en cada período de modificación, que tiene una longitud de 4096 tramas, es decir, 40,96 segundos. Esto corresponde a 4 períodos SFN, por lo que los 2 LSB del número de hipertrama se indican en MIB-NB. Si se produce una modificación de este tipo, se indica en el NPDCCH mediante el formato DCI N2.

Aunque se envían a través del NPDSCH, los recursos SIB1-NB se mapean como el MIB-NB, es decir, se omiten los primeros 3 símbolos OFDM. Esto es necesario, porque el UE conoce el inicio de la asignación de recursos de SIB1 NB, por lo que primero debe decodificar este SIB.

### 3.2.4.2 Enlace ascendente (Uplink)

La red NB-IoT cambia el canal físico del enlace ascendente y rediseña parte de éste, además, no admite el canal físico de control de enlace ascendente.

Con el objetivo de mejorar la cobertura del enlace ascendente, el sistema NB-IoT introduce un mecanismo de retransmisión en el canal físico del mismo. Debido a los requisitos de bajo coste, el sistema NB-IoT está equipado con un terminal de oscilador de cristal de bajo coste, por lo tanto, durante las transmisiones del uplink, la disipación del amplificador de potencia del terminal causa un cambio de temperatura, que conduce a la desviación de la frecuencia del oscilador de cristal, que afecta en el rendimiento de transmisión del uplink y reduce la eficiencia de transmisión de datos. Para corregir esta variación de frecuencia, se introduce en NB-IoT, un intervalo de transmisión de uplink, que permite que el terminal suspenda la transmisión, cambie a downlink y realice el seguimiento síncrono y la compensación de desplazamiento de frecuencia. Después de este periodo, el terminal cambia a uplink y continúa transmitiendo.

Para el enlace ascendente hay dos canales físicos:

- NPRACH: Canal físico de acceso aleatorio de banda estrecha.
- NPUSCH: Canal físico compartido de uplink de banda estrecha.

Y una señal:

- Señal referencia de demodulación (DMRS).

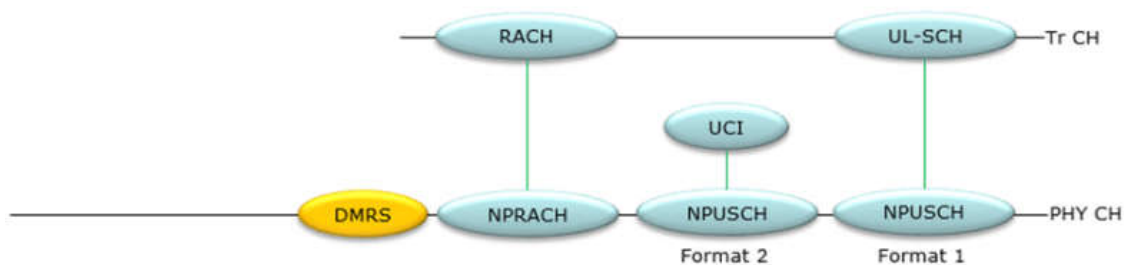


Figura 21: Mapeo entre los canales de transporte (Tr) y los canales físicos (PHY) en uplink [50]

A excepción de la transmisión RACH, todos los datos se envían a través del NPUSCH, incluyendo la información de control de enlace ascendente (UCI), que se transmite en un formato diferente, no hay equivalente a PUCCH en LTE.

#### NPRACH

NPRACH es un canal de nuevo diseño para el transporte del preámbulo de acceso aleatorio enviado por el NB-IoT UE, ya que el canal físico de acceso

aleatorio LTE (PRACH) utiliza un ancho de banda de 1.08 MHz, mucho mayor que el ancho de banda del uplink NB-IoT.

El procedimiento de acceso aleatorio asociado se usa para indicar a la celda que el UE está instalado en ella y desea obtener acceso.

Un preámbulo NPRACH consta de cuatro grupos de símbolos en una sola subportadora, y cada grupo de símbolos comprende un prefijo cíclico (CP) y cinco símbolos [14]. La siguiente estructura muestra esta secuencia:

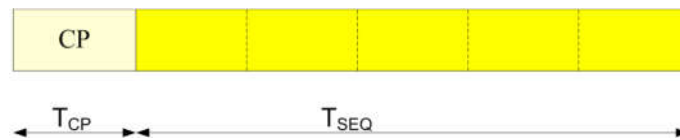


Figura 22. Grupo de símbolos de un preámbulo NPRACH [49]

Se definen dos formatos de preámbulo (0, 1) que difieren en su longitud de CP. Los cinco símbolos tienen una duración  $T_{SEQ}=1.333\text{ms}$ , precedido por un CP de  $T_{CP}=67\mu\text{s}$  para el formato 0 y  $267\mu\text{s}$  para el formato 1, lo que da una longitud total de 1.4ms y 1.6ms, respectivamente. El formato de preámbulo que se utilizará se transmite en la información del sistema.

El salto de frecuencia se aplica a la granularidad del grupo de símbolos, es decir, cada grupo de símbolos se transmite en una subportadora diferente. Por construcción, este salto está restringido a un conjunto contiguo de 12 subportadoras. Dependiendo del nivel de cobertura, la celda puede indicar que el UE repita el preámbulo 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128 veces, utilizando la misma potencia de transmisión en cada repetición.

Las asignaciones de recursos NPRACH son periódicas. Su inicio dentro de un período se proporciona en la información del sistema y el número de repeticiones y el formato del preámbulo determinan su final.

En el rango de frecuencia, se aplica un espaciado de subportadora de 3.75kHz.

El algoritmo de salto de frecuencia está diseñado de manera que diferentes selecciones de la primera subportadora conducen a esquemas de salto que nunca se superponen, por lo tanto, hay tantos preámbulos libres de congestión diferentes como subportadoras asignadas al NPRACH.

## NPUSCH

NPUSCH transporta el UL-SCH (Uplink Shared Channel) y la confirmación HARQ en respuesta a la transmisión descendente. Tiene dos formatos:

- El formato 1 se utiliza para transportar datos de uplink a través de UL-SCH y utiliza el mismo turbo-código que LTE para la corrección de errores. El tamaño máximo del bloque de transporte del formato NPUSCH 1 es de 1000 bits, que es mucho menor que en LTE.
- El formato 2 transporta información de control uplink (UCI), que está restringido a la señalización de confirmación HARQ por NPDSCH (acuse de recibo de una transmisión downlink), y utiliza un código de repetición para la corrección de errores.

» El formato 1 de NPUSCH soporta la transmisión multitono, pudiendo asignar al UE 12, 6 o 3 tonos. Los formatos de 6 y 3 tonos se introducen para los NB-IoT UE que, debido a la limitación de la cobertura, no pueden beneficiarse de una mayor asignación de ancho de banda para el UE. Además, NPUSCH admite la transmisión de tono único de 15 o 3,75 kHz.

Para el formato NPUSCH 1 y el espaciado de subportadora de 3.75 kHz, una RU (unidad de recurso) consta de 1 subportadora en el rango de frecuencia y 16 intervalos en el rango de tiempo, es decir, una RU tiene una longitud de 32ms. En el espaciado de subportadora de 15 kHz hay 4 opciones:

Número de subportadoras	Número de slots	Duración de RU
1	16	8 ms
3	8	4 ms
6	4	2 ms
12	2	1 ms

Tabla 10. Duración de RU con espaciado de subportadora 15kHz para el formato NPUSCH 1

El formato NPUSCH 1 tiene 7 símbolos OFDM/slot, uno de los cuales es el símbolo de referencia de demodulación (DMRS).

Las modulaciones permitidas para el formato 1 de NPUSCH dependen de la RU seleccionada:

- Para las RU con una subportadora, se pueden utilizar BPSK y QPSK.
- Para todas las demás RU, se aplica QPSK.

» Para el formato 2, la RU siempre se compone de una subportadora con una longitud de 4 slots. En consecuencia, para el espaciado de subportadora de 3.75 kHz, la RU tiene una duración de 8 ms y para el de 15 kHz de 2 ms.

El formato 2 de NPUSCH también tiene 7 símbolos OFDM/slot, pero utiliza 3 símbolos como DMRS, que se utilizan para la estimación del canal.

En este formato el esquema de modulación es siempre BPSK.

La concesión para la transmisión UL-SCH se indica en el NPDCCH a través del formato DCI N0. El momento de inicio del NPUSCH, el número de repeticiones, el número de RU utilizados para un TBS y el número de subportadora se indican en este DCI. También se incluye el índice MCS, que proporciona el esquema de modulación para las subportadoras RU y el tamaño del bloque de transporte.

Finalmente, la señal de tiempo se crea aplicando una transformación inversa de Fourier y anteponiendo un prefijo cíclico. Para el espaciado de subportadora de 15 kHz, este CP es el mismo que para LTE, mientras que para 3,75 kHz es 256 muestras, lo que corresponde a 8,3  $\mu$ s. Para el último caso, un período de 2304 muestras (75  $\mu$ s) al final de cada slot permanece vacío, que se utiliza como un intervalo de guarda.

El enlace ascendente siempre tiene una confirmación en el downlink asociado.

## DMRS

La DMRS, señal de referencia de demodulación, se multiplexa con los datos, de modo que solo se transmite en las RU que contienen transmisión de datos y los símbolos DMRS tienen la misma modulación que los datos asociados.

No hay una transmisión MIMO definida para el enlace ascendente, por lo tanto, todas las transmisiones usan un solo puerto de antena.

Dependiendo del formato NPUSCH, DMRS se transmite en uno o tres símbolos SCFDMA por slot. Para el formato 1 de NPUSCH, estos son los símbolos indicados en rojo en la siguiente figura:

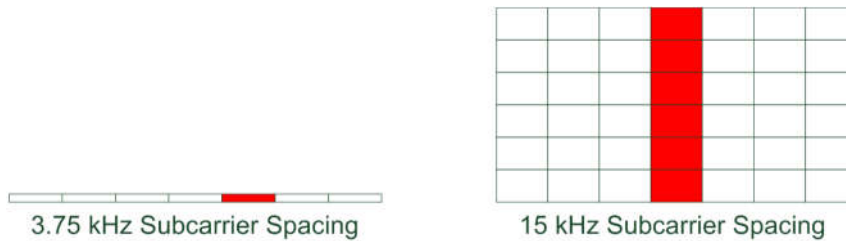


Figura 23. Elementos de recurso utilizados para DMRS en formato NPUSCH 1 [49]

Esta figura muestra el ejemplo de una ocupación de RU con 6 subportadoras para el espaciado de 15 kHz. Como se puede ver, los símbolos SC-FDM para la transmisión de DMRS dependen del espaciado de la subportadora, también para el formato NPUSCH 2 que se muestra en la figura 25. En este formato, la RU generalmente ocupa solo una subportadora.



Figura 24. Elementos de recursos utilizados para DMRS en formato NPUSCH 2 [49]

### 3.2.4.3 Opciones de despliegue

El diseño de NB-IoT ocupa una banda de frecuencia de 180kHz de ancho de banda, que se corresponde con un bloque de recursos de transmisión LTE. Esto permite varias opciones de implementación para el espectro GSM, WCDMA o LTE. Estas opciones de despliegue son:

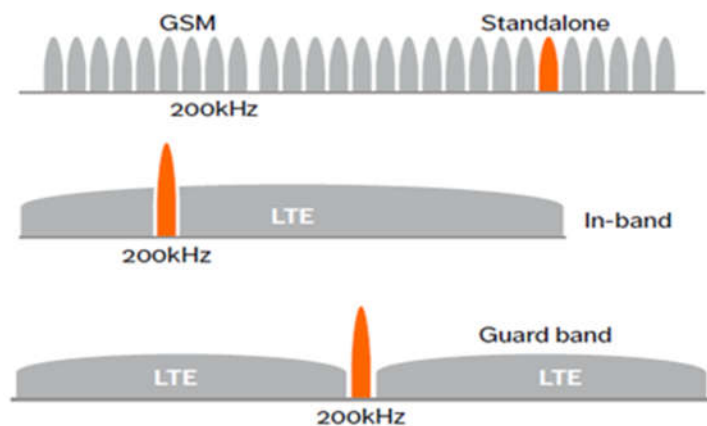


Figura 25. Uso del espectro según opciones de despliegue [3]

- Dentro de una portadora LTE (in-band): se implementa NB-IoT dentro de un LTE normal, simplemente en bloque de recursos (RB) no utilizado (reservado) de la banda LTE.
- En la banda de guarda (guard-band): cada banda LTE tiene al menos 100kHz de banda de guarda en cada final de banda, por lo que se tiene un espacio de unos 200kHz entre 2 bandas cualquiera, incluso si se

encuentran en localizaciones lo más cercanas posible. En esta banda de guarda es donde se implementa el modo guard-band.

- En modo autónomo (standalone): implementación completamente independiente de cualquier LTE desplegado. Un caso extremo sería el despliegue en un espacio libre del espectro, pero en la práctica lo que se pretende es la implementación en un canal GSM.

Cualquiera que sea el escenario de implementación, debe ser transparente para un UE cuando se enciende por primera vez y busca una portadora. La portadora NB-IoT destinada a facilitar la sincronización inicial del UE se denomina portadora de anclaje. Para el modo in-band, la portadora de anclaje solo se puede colocar en ciertos PRB, para las implementaciones standalone y de banda de guarda, no es necesario proteger ningún recurso LTE.

### 3.2.4.4 Control de potencia

» En el uplink, la potencia transmitida depende de una combinación de parámetros de celda, los parámetros medidos de RU y UE seleccionados [33]. Si hay un máximo de 2 repeticiones, la potencia en el slot  $i$  viene dada por:

$$P_{NPUSCH,c}(i) = \min \left\{ P_{CMAX,c}(i), 10 \log_{10} (M_{NPUSCH,c}(i)) + P_{O\_NPUSCH,c}(j) + \alpha_c(j) \cdot PL_c \right\}$$

Ecuación 2. Potencia de slot

En el caso de más de dos repeticiones, la potencia de transmisión generalmente viene dada por  $P_{CMAX,c}(i)$ , que es la potencia de transmisión máxima específica de la celda en el slot  $i$ . Con la construcción anterior, la potencia transmitida nunca puede exceder este umbral.

- $M_{NPUSCH,c}$  depende del ancho de banda de la RU seleccionada y del espaciado de la subportadora.
- $P_{O\_NPUSCH,c}$  es una combinación de parámetros señalados por el RRC, que depende de si el bloque de transporte es para datos UL-SCH ( $j=1$ ) o para el mensaje RACH ( $j=2$ ).
- $PL_c$  es la pérdida de trayectoria estimada por el UE.
- $\alpha_c(j)$  pondera el factor  $PL_c$ , que para el formato NPUSCH 1 lo proporciona RRC, de lo contrario se aplica el valor fijo de 1. Este factor indica cuanto debe compensarse la pérdida de trayectoria.

» La potencia de transmisión del downlink es la potencia de transmisión del NRS. Su valor se indica al UE para estimar la pérdida de trayectoria y es constante para todos los RE que llevan el NRS y todas las subtramas.

Para el NPBCH, NPDCCH y NPDSCH, la potencia de transmisión depende del esquema de transmisión. Si solo se aplica un puerto de antena, la potencia es la misma que para el NRS, de lo contrario se reduce en 3dB.

Se produce un caso especial si se usa el modo de operación en banda y el valor de samePCI se establece en verdadero, en este caso, el eNB puede equiparar la relación de la potencia NRS a la de CRS, permitiendo al UE utilizar también el CRS para la estimación del canal.

### 3.2.5 Acceso a celda

Cuando un UE accede a una celda sigue el mismo principio que LTE, busca una celda en una frecuencia apropiada, lee la información SIB asociada e inicia el procedimiento de acceso aleatorio para establecer una conexión RRC. Con esta conexión, se registra en la red central a través de la capa NAS. Después de que el UE haya regresado al estado RRC\_idle, puede usar nuevamente el procedimiento de acceso aleatorio si tiene datos originados en el móvil para enviar, o esperar hasta que se localice.

Cuando un UE se enciende por primera vez, necesita detectar una celda adecuada para alojarse temporalmente y obtener el símbolo, subtrama y temporización de trama, así como sincronizar la frecuencia portadora. Además, debido a la presencia de múltiples celdas, el UE necesita distinguir una en particular basándose en un NCellID.

NB-IoT está diseñado para usarse en dispositivos de muy bajo coste y, al mismo tiempo, brinda cobertura extendida para los UE desplegados en entornos con altas pérdidas de penetración. Dichos dispositivos están equipados con osciladores de cristal de bajo coste que pueden tener un offset inicial de frecuencia de portadora (CFO) tan grande como 20 ppm.

El despliegue in-band y en banda de guarda introduce un desplazamiento de trama adicional (2.5 o 7.5kHz), dando lugar a un CFO aún más alto. A pesar de este gran CFO, un UE debería ser capaz de realizar una sincronización precisa con una relación señal/ruido muy baja.

La sincronización en NB-IoT sigue los principios de LTE, pero con cambios en el diseño para resolver el problema de estimar la compensación del elevado offset de frecuencia y el timing de símbolos a una SNR muy baja. La sincronización se logra mediante el uso de NPSS y NSSS. El NPSS se usa para obtener el timing de símbolo y el CFO, y el NSSS para obtener el NCellID y el timing dentro de un bloque de 80ms.

Para los UE que operan a una SNR muy baja, una autocorrelación basada en un solo segmento recibido de 10ms no sería suficiente para la detección, es necesario un procedimiento de acumulación de múltiples segmentos, que debido al diseño de NPSS, puede realizarse proporcionando suficiente energía de señal para la detección.

Una vez que se completa la sincronización, el UE tiene conocimiento del timing de símbolo, el CFO, la posición dentro de un bloque de 80ms y el NCellID. Después, el UE procede a la adquisición del MIB, transportado por NPBCH; éste consta de 8 subbloques y cada uno se repite 8 veces, por lo que cada subbloque ocupa la SF#0 de 8 tramas consecutivas, es decir, una palabra de código NPBCH se distribuye en 64 tramas (640 ms). Este diseño permite una adquisición exitosa para los UE en una cobertura profunda.

Una vez que se conoce el timing de símbolo y se compensa el CFO, en el despliegue in-band y en banda de guarda, todavía hay un offset de trama adicional que puede llegar a ser de 7.5kHz, dando como resultado un error de compensación de la frecuencia de la portadora; por ello, el timing de símbolo se desplaza hacia adelante o hacia atrás, dependiendo de si fue sobrecompensada o infracompensada. Esto puede causar una severa degradación en el





SIBTipo5-NB	Información relativa a vecindades de celda, relevante para reelección de celda interfrecuencia
SIBTipo14-NB	Parámetros de restricción de acceso
SIBTipo16-NB	Información relativa a la hora GPS y UTC (Coordinated Universal Time)

Tabla 11. Contenido de SIB-NB [49]

- El tipo de contenido de los SIB es el mismo que en LTE, pero los UE NB-LoT utilizan exclusivamente éstos e ignoran los de LTE.
- Siempre es obligatorio que un UE tenga una versión válida de MIB-NB, SIB1-NB y SIB2-NB. Los otros deben ser válidos si se requiere su funcionalidad para la operación.

La adquisición y cambio de información del sistema solo se aplica en el estado RRC\_idle, si se produce un cambio en el estado RRC\_connected, se informa al UE mediante paging o una indicación directa. El eNB también puede liberar al UE al estado RRC\_idle para adquirir el SIB modificado.

### Scheduling

El MIB y el SIB1 se transmiten como se indica en el apartado 3.2.4.1 “Enlace descendente”. El scheduling de la información SIB restante se realiza de manera análoga a LTE, los mensajes SIB se agrupan en mensajes SI, que luego se transmiten en ventanas SI separadas. Las ventanas SI de diferentes mensajes no se superponen, su longitud se indica en SIB1 y es la misma para todos los mensajes SI. El tamaño máximo de mensaje SIB y SI es de 680 bits.

Dentro de una ventana SI, los mensajes SI se envían a través de 2 u 8 subtramas downlink válidas consecutivas, dependiendo del tamaño de su bloque de transporte, y pueden repetirse varias veces. La información de scheduling se indica en SIB1, por lo tanto, no hay ninguna indicación necesaria en el NPDCCH y no se necesita un SI-RNTI.

### Notificación de cambio

Como ya se mencionó anteriormente, la información del sistema solo puede cambiar dentro de un período de modificación y se indica con un mensaje paging. Una excepción es el cambio en la restricción de acceso (AB) indicado a través de SIB14, esta información se puede cambiar en cualquier momento. La razón de esto es que los parámetros AB pueden requerirse para cambios en una escala de tiempo mucho más corta. Por otra parte, SIB16 no está indicado por una notificación de paging, ya que su contenido cambia regularmente.

Otra forma de indicar cambios en SIB1 o en mensajes SI es el concepto de valor de etiqueta (value tag), cuyo campo asociado (systemInfoValueTag) está contenido en MIB. Este concepto se utiliza para los UE que regresan de una ubicación fuera de cobertura a zona de cobertura y para regresar de un ciclo DRX más largo. En estos casos, el UE no pudo recibir el mensaje de paging, por lo que verifica el valor de etiqueta. Si hubo cambios de SIB, se modifica el valor de etiqueta, sin embargo, si el UE estuvo fuera de cobertura durante más de 24 horas, debe leer la información del sistema de todos modos.

### Resumen de la adquisición de SIB

El UE primero obtiene el NCellID de la NSSS. Al leer la schedulingInfoSIB1 en MIB, conoce el tamaño de SIB1 y el número de repeticiones. En SIB1, se indica la ubicación de los otros mensajes SIB. Finalmente, con la ayuda de los 2 LSB

del número de hipertrama obtenido de MIB, el UE sabe cuándo verificar las actualizaciones de SIB, si un cambio de SIB se indica mediante un valor de etiqueta modificado, o se indica por paging.

### **3.2.5.3 Selección de celda y movilidad**

NB-IoT está diseñado para mensajes cortos y poco frecuentes entre el UE y la red. Se supone que el UE puede intercambiar estos mensajes mientras se están sirviendo desde una celda y no se necesita un procedimiento de handover durante RRC\_connected. Si fuera necesario un cambio de celda, el UE debe pasar al estado RRC\_idle y seleccionar otra celda en dicho estado.

Para el estado RRC\_idle, la reelección de celda se define tanto para celdas intrafrecuencia como interfrecuencia [34]. En este caso, la interfrecuencia se refiere a la portadora de 180kHz, lo que significa que incluso si se usan dos portadoras en la operación in-band integrada en la misma portadora LTE, esto también se entiende como una reelección entre frecuencias.

Para encontrar una celda, el UE primero mide la potencia y la calidad recibida del NRS, estos valores se comparan con los umbrales específicos de celda proporcionados por el SIB-NB. El S-criteria establece que, si ambos valores están por encima de los umbrales, el UE considera que está dentro de la cobertura de esa celda y se aloja en ella.

Dependiendo de la potencia NRS recibida, el UE puede tener que iniciar una nueva selección de celda, entonces, el UE compara esta potencia con un umbral de reelección. Todos los parámetros requeridos se reciben de la celda de servicio real, no es necesario leer los SIB-NB de otras celdas.

Entre todas las celdas que cumplen los S-criteria, el UE clasifica las celdas, además, se añade una histéresis en este proceso para evitar una reelección de celdas demasiado frecuente. Contrariamente a LTE, no hay prioridades para las diferentes frecuencias. El UE finalmente selecciona la celda con la clasificación más alta desde la que puede recibir el servicio.

Cuando el UE deja el estado RRC\_connected, no necesariamente selecciona la misma portadora para encontrar celda. El mensaje RRCConnectionRelease puede indicar la frecuencia en la que el UE intenta encontrar una celda adecuada y solo si no lo consigue, intenta encontrar una en otra frecuencia.

### **3.2.5.4 Procedimiento de acceso aleatorio**

En NB-IoT, el acceso aleatorio sirve para múltiples propósitos, como el acceso inicial cuando establece un enlace y la solicitud de scheduling. Uno de los objetivos principales del acceso aleatorio es lograr la sincronización del uplink, importante para mantener la ortogonalidad de este enlace en NB-IoT.

Para servir a los UE en diferentes clases de cobertura, la red puede configurar hasta tres configuraciones de recursos NPRACH en una celda. En cada configuración, se especifica un valor de repetición para repetir un preámbulo de

acceso aleatorio básico. El UE mide la potencia de la señal recibida en el enlace descendente para estimar su nivel de cobertura, y transmite un preámbulo de acceso aleatorio en los recursos NPRACH configurados para su nivel de cobertura estimado. Para facilitar la implementación en diferentes escenarios, NB-IoT permite la configuración flexible de los recursos NPRACH en una matriz de recursos tiempo-frecuencia con los siguientes parámetros:

- Dominio del tiempo: periodicidad de recurso NPRACH y momento de inicio del recurso NPRACH en un período.
- Dominio de la frecuencia: localización de frecuencia y número de subportadoras.

Algunas implementaciones de UE no admiten la transmisión multitono, por lo tanto, la red debe ser consciente de esta capacidad antes del scheduling de la transmisión de uplink, para admitirlo, la red divide las subportadoras NPRACH en el dominio de la frecuencia en dos conjuntos que no se superponen. Un UE puede seleccionar uno de los dos conjuntos para transmitir su preámbulo de acceso aleatorio para indicar si es compatible o no con la transmisión multitono. El procedimiento RACH tiene el mismo flujo de mensajes que para LTE, pero con diferentes parámetros:

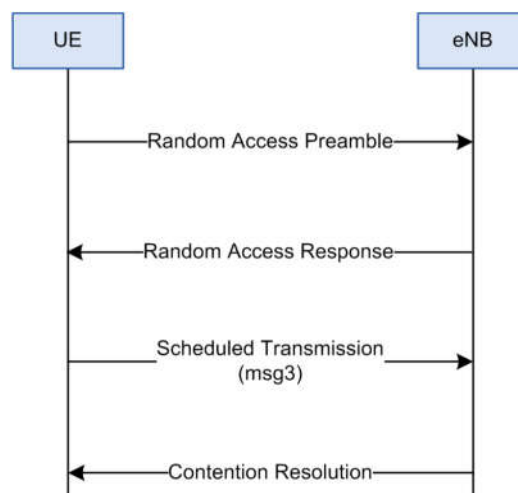


Figura 27. Flujo de mensajes para el procedimiento RACH [35]

Cada uno de estos mensajes se repite de acuerdo con el nivel CE de los UE. En NB-IoT, el procedimiento RACH comienza con la transmisión de un preámbulo, como se ha explicado anteriormente. Después de la respuesta asociada del eNB, un mensaje programado (msg3) se transmite para iniciar el proceso de resolución de conflictos y el mensaje de resolución asociado se transmite al UE para indicar la finalización satisfactoria del procedimiento.

Tras la transmisión del preámbulo, el UE primero calcula su RA-RNTI a partir del tiempo de transmisión, a continuación, busca en el PDCCH el formato DCI N1 mezclado con el RA-RNTI, en el que se indica el mensaje de respuesta de acceso aleatorio (RAR). El UE espera este mensaje dentro de la Ventana de Respuesta, que empieza 3 subtramas después de la última subtrama de preámbulo y tiene una longitud dependiente de CE dada en SIB2-NB.

Si la transmisión del preámbulo no tuvo éxito (no se recibió el mensaje RAR asociado) el UE transmite otro, hasta un número máximo, que depende del nivel

de CE. En el caso de que este número máximo se alcance sin éxito, el UE pasa al siguiente nivel CE, si está configurado. Si se alcanza el número total de intentos de acceso, se informa al RRC de un fallo asociado.

Con el RAR, el UE obtiene, además de un C-RNTI temporal, el comando de avance de timing. En consecuencia, el siguiente msg3 ya está alineado en el tiempo, necesario para la transmisión a través del NPUSCH. Además, el RAR proporciona la concesión uplink para msg3, que contiene todos los datos relevantes para la transmisión de msg3.

El procedimiento restante es como en LTE, el UE envía una identificación y, al recibir la resolución de contención indicada en esta identificación, el procedimiento de acceso aleatorio finaliza con éxito.

En resumen, el UE determina su nivel de cobertura midiendo la potencia de la señal recibida del downlink. Después de leer la información de sistema sobre la configuración de recursos NPRACH, el UE puede determinar el recurso NPRACH configurado y el número de repeticiones necesarias para su nivel de cobertura estimado y potencia de transmisión. Luego, el UE puede transmitir repeticiones del preámbulo de acceso aleatorio dentro de un período de los recursos NPRACH. Los pasos restantes en el procedimiento de acceso aleatorio son similares a LTE. Se puede encontrar más información en [16].

### 3.2.5.5 Control de conexión

Al tratarse de un sistema que no admite el handover a una tecnología diferente, el modelo de estado del RRC es bastante simple.



Figura 28. Modelo de los estados del RRC y sus transiciones [49]

Al igual que en LTE, solo hay dos estados, RRC\_idle y RRC\_connected. No hay transiciones a los estados UTRA y GSM, al no admitirse el handover a estas tecnologías; tampoco a LTE, que se considera una tecnología diferente.

#### Establecimiento de conexión RRC

El establecimiento de conexión RRC tiene el mismo flujo de mensajes que para el sistema LTE, sin embargo, el contenido es diferente:

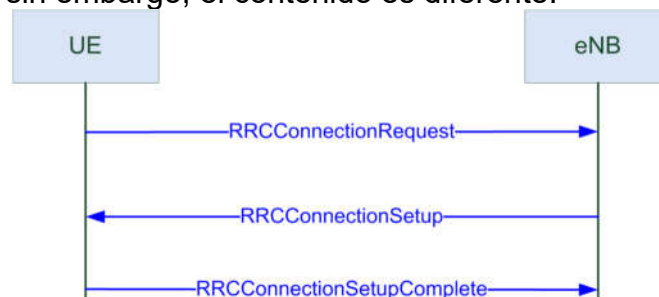


Figura 29. Establecimiento de conexión RRC [49]

Con el RRCConnectionRequest, el UE indica que quiere conectarse a la red y con qué propósito. Esto está restringida a la señalización originada en el móvil,

los datos originados en el móvil, el acceso terminado por el móvil y los informes excepcionales. El UE indica su capacidad para soportar el tráfico de multitonos y el soporte de multi-portadoras, éstas deben estar señaladas aquí para que el eNB pueda aplicarlas para las concesiones de uplink en este procedimiento.

Al responder con el mensaje RRCConnectionSetup, el eNB proporciona la configuración de la portadora de señalización (SRB1), hasta 2 portadoras de datos (DRB) y los protocolos. En el mensaje RRCConnectionSetupComplete, finalmente, el UE incluye su PLMN (Public Line Mobile Network) y MME seleccionados, y puede incluir el primer mensaje NAS.

Cuando el eNB libera la conexión, también puede suspender el UE, en este caso, el UE pasa al estado RRC\_idle y almacena el contexto AS actual. Puede reanudar más tarde el estado RRC\_connected con ese contexto, las portadoras se configuran automáticamente y la seguridad se activa con las claves actualizadas, además, partes del contexto AS pueden ser cambiadas. Obviamente, esto ahorra una considerable sobrecarga de señalización para la transmisión de pequeños paquetes de datos poco frecuentes.

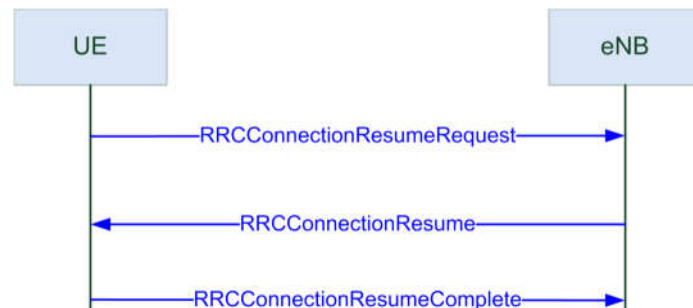


Figura 30. Solicitud de reanudación de conexión RRC aceptada por el eNB [49]

Al recibir el RRCConnectionResumeRequest, el eNB decide si la acepta o si se debe iniciar una configuración de conexión RRC convencional. Si no acepta la solicitud de reanudación, vuelve a la solicitud de conexión.

Si se rechaza la solicitud de conexión o reanudación, el eNB responde con un RRCConnectionReject y el UE tiene que esperar un período proporcionado por el mensaje de rechazo. Así, el eNB puede evitar el atasco cuando demasiados UE inician la conexión de red simultáneamente. Si el rechazo es para un procedimiento de reanudación, el eNB indica si el contexto AS actual del UE se liberará o se mantendrá almacenado para otra solicitud de reanudación.

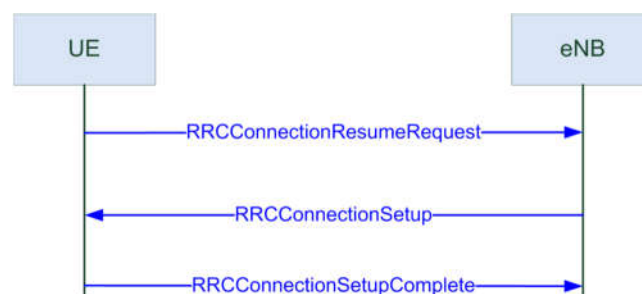


Figura 31. Solicitud de reanudación de conexión RRC no aceptada por el eNB [49]

### Cese de conexión RRC

El cese de la conexión RRC siempre la activa el eNB.



Figura 32. Release de la conexión RRC [49]

El eNB puede indicar la suspensión de la conexión con el indicador `rrcSuspend`. En este caso, el UE almacena el contexto AS y puede solicitar una reanudación de la conexión RRC como se describe anteriormente; de lo contrario, el contexto AS se elimina y el UE solo puede obtener otra conexión RRC utilizando la configuración completa de la conexión RRC. Una vez finalizado este procedimiento, el UE entra en el estado `RRC_idle`.

### 3.2.5.6 Transferencia de capacidad del UE

Cuando el UE se conecta a la red, el eNB no conoce las características del UE, por lo que se define el procedimiento de transferencia de capacidad del UE.

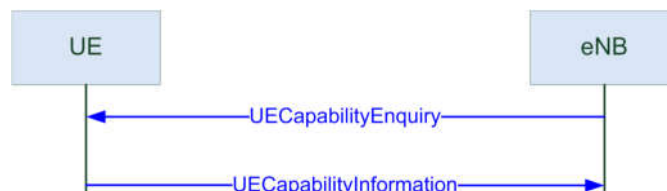


Figura 33. Transferencia de capacidad de UE [49]

La transferencia de capacidad del UE siempre la inicia el eNB, porque el UE no puede saber si ya tiene esta información de la red o de una sesión anterior. Las capacidades incluyen la categoría del UE y la lista de bandas admitidas, además, el UE puede indicar si admite la operación de portadora múltiple y la transmisión multitono en uplink. También puede contener el número máximo de sesiones de contexto de RoHC (Robust Header Compression) y los perfiles soportados.

### 3.2.5.7 Paging

El paging se utiliza para activar una conexión RRC e indicar un cambio en la información del sistema para el UE en el modo `RRC_idle`.

El mensaje paging se envía a través del NPDSCH y puede contener una lista de los UE que se paginarán (en el caso de que sea para la configuración de la conexión) y la información que ha cambiado. Cada UE que encuentra su ID en esta lista reenvía a su capa superior que está paginado, y puede recibir a su vez el comando para inicializar una conexión RRC.

Si la información del sistema ha cambiado, el UE comienza a leer SIB1-NB y puede obtener de allí la información (qué SIB se deben leer nuevamente).

El UE en el estado `RRC_idle` solo supervisa algunas de las subtramas con respecto al paging, las ocasiones de paging (PO) dentro de un subconjunto de tramas y las tramas de paging (PF). Si se aplican repeticiones de mejora de cobertura, la PO se refiere a la primera transmisión dentro de las repeticiones.

Las PF y las PO se determinan a partir del ciclo DRX proporcionado en SIB2 y el IMSI (International Mobile Subscriber Identity) proporcionado por la tarjeta USIM (Universal Subscriber Identity Module). DRX es la recepción discontinua del canal de control downlink, usado para ahorrar vida útil de la batería.

Debido al hecho de que el algoritmo para determinar las PF y las PO también depende de la IMSI, los diferentes UE tienen diferentes ocasiones de paging, que se distribuyen uniformemente en el tiempo. Es suficiente con que el UE supervise una ocasión de paging dentro de un ciclo DRX, si hay varias ocasiones de paging en el mismo, éste se repite en cada una de ellas.

El concepto de DRX extendido (eDRX) también se puede aplicar para NB-IoT, si se admite eDRX, entonces el intervalo de tiempo en el que el UE no supervisa los mensajes de paging puede ampliarse considerablemente, hasta casi 3 horas.

### 3.2.6 Transferencia de datos

Como se ha descrito, hay dos formas de transferencia de datos, la optimización de CloT EPS en el plano de control y en el de usuario. El MME indica el soporte para cada una. Para datos originados en dispositivos móviles, el UE puede seleccionar entre las opciones admitidas y para los datos terminados en el móvil, la MME elige la optimización y puede tener en cuenta la preferencia del UE, que se señala a la red en el procedimiento de conexión.

#### 3.2.6.1 Optimización CloT EPS en el plano de control

Para el plano de control, el intercambio de datos entre el UE y el eNB se realiza en el nivel RRC. En el downlink, los paquetes de datos se pueden incluir en el mensaje RRCConnectionSetup y en el uplink, en RRCConnectionSetup-Complete. Si esto no es suficiente, la transferencia de datos puede continuar utilizando los dos mensajes DLInformationTransfer y ULInformationTransfer:

En estos mensajes se incluye una matriz de bytes que contiene información del NAS que, en este caso, corresponde a los paquetes de datos NB-IoT. Es transparente para el eNB, y el RRC del UE envía el contenido de la DL-InformationTransfer recibida directamente a su capa superior. Entre el eNB y el MME, el intercambio de información se realiza a través de la interfaz S1-MME. Para este método de transferencia de datos, la seguridad en el nivel de AS no se aplica. Como tampoco hay una reconfiguración de la conexión RRC, puede comenzar inmediatamente después o durante la configuración de la conexión RRC o reanudar el procedimiento. Posteriormente, la conexión RRC debe terminarse con la suspensión de la conexión RRC.

#### 3.2.6.2 Optimización CloT EPS en el plano de usuario

En el plano de usuario, los datos se transfieren a través del plano de usuario convencional a través de la red, es decir, el eNB renvía los datos a la S-GW o



los recibe de este nodo. Para mantener baja la complejidad del UE, solo se pueden configurar una o dos DRB (portadora de datos) simultáneamente.

Se deben distinguir dos casos:

- Cuando se liberó la conexión RRC anterior con una posible operación de reanudación, la conexión se puede solicitar como un procedimiento de reanudación. Si este procedimiento de reanudación es exitoso, la seguridad se establece con claves actualizadas y la portadora se configura como en la conexión anterior.
- Si no hubo una versión anterior con una indicación de reanudación, o si el eNB no aceptó la solicitud de reanudación, la seguridad y la portadora radio deben establecerse como se describe a continuación.

### Establecimiento y configuración de la conexión de datos.

Después de configurar la conexión RRC, el primer paso es establecer el nivel de seguridad AS a través del procedimiento de activación de seguridad inicial.

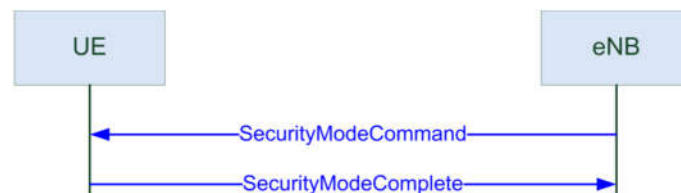


Figura 34. Establecimiento del nivel de seguridad AS [49]

En el mensaje SecurityModeCommand, el eNB proporciona al UE el algoritmo de cifrado, que se aplicará en el SRB1 y la DRB, y el algoritmo de protección de integridad para proteger el SRB1. Todos los algoritmos definidos para LTE también se incluyen en NB-IoT. Con este mensaje, el SRB1bis cambia automáticamente al SRB1 para los siguientes mensajes de control.

Una vez activada la seguridad, las DRB se configuran mediante el procedimiento de reconfiguración de la conexión RRC.



Figura 35. Procedimiento de reconfiguración de la conexión RRC [49]

En el mensaje de reconfiguración, el eNB proporciona la portadora al UE, con la configuración del RLC y los canales lógicos. Este último incluye una prioridad para equilibrar la transmisión de datos de acuerdo con los requisitos reales.

En la configuración MAC incluida, se proporcionan la configuración para el informe de estado del búfer (BSR), la solicitud de scheduling (SR), la alineación temporal y el DRX. Finalmente, la configuración física proporciona los parámetros necesarios para asignar los datos a los slots y las frecuencias.

### Configuración multiportadora

El RRCConnectionReconfiguration puede contener la configuración de una portadora adicional en enlace ascendente y descendente: portadora no-anclaje. Cuando se proporciona una portadora no-anclaje en downlink, el UE recibirá

todos los datos en esta frecuencia. Esto excluye la sincronización, la información de broadcast y el paging, que solo se reciben en la de anclaje. Esta portadora puede contener muchas más subtramas para los datos, ya que no requiere sincronización e información de broadcast.

Una vez que se configura la portadora no-anclaje, el UE solo la escucha mientras está en el estado RRC\_connected, en consecuencia, el UE solo requiere una cadena de receptores.

En uplink se aplica el mismo principio. Si se configura una portadora uplink adicional, el UE solo toma ésta para la transmisión de datos, no hay transmisión simultánea en esta portadora y la portadora de anclaje.

El UE regresa a su portadora de anclaje cuando se libera al estado RRC\_idle. Incluso en la operación in-band, la portadora no-anclaje no está restringida a ciertos valores de PRB, como lo está la anclaje.

Esta estructura permite desplegar una red de banda ancha NB-IoT, ya que la sincronización, el broadcast en downlink y los recursos NPRACH en el uplink pueden estar restringidas a varias portadoras, mientras que las otras pueden usarse para la transmisión de datos. Como la recepción y la transmisión nunca se realizan simultáneamente, es suficiente que el UE tenga una cadena de transmisor/receptor con un ancho de banda de 180kHz.

### **Recepción del canal de control**

En el estado RRC\_connected, el UE solo supervisa el espacio de búsqueda específico (USS) del UE para obtener sus concesiones uplink y asignaciones de downlink. El mensaje de reconfiguración contiene el número máximo de repeticiones, que varía entre 1 y 2048 en potencias de 2, sin embargo, el número real de repeticiones puede ser menor.

Si el número real de repeticiones es menor que el máximo, las subtramas restantes se pueden usar para enviar un NPDCCH diferente a otro UE.

El mensaje de reconfiguración también contiene un parámetro para describir el período NPDCCH.

### **Transmisión del canal de datos uplink**

El formato DCI N0 indica una concesión uplink para la transmisión en NPUSCH, incluyendo todos los parámetros relevantes. Un bloque de transporte puede repetirse varias veces, dependiendo la disposición de las repeticiones del número de subportadoras para una RU, el espaciado de la subportadora y el número de repeticiones.

Normalmente, la secuencia se asigna a un conjunto contiguo de slots, produciéndose una excepción en un número alto de repeticiones. Después de una transmisión de 256 ms, se crea un intervalo de 40 ms antes de que se continúe con la transmisión NPUSCH. Esta brecha es necesaria, porque cuando el UE transmite en el NPUSCH, no puede recibir simultáneamente el canal downlink y puede perder la sincronización con el eNB. Durante este intervalo, la sincronización se vuelve a ajustar.

### **Recepción del canal de datos downlink**

El formato DCI N1 indica la asignación de downlink que describe dónde y cómo se transmiten los símbolos de datos en NPDSCH. El principio es esencialmente el mismo que para el uplink, sin embargo, los paquetes de datos no se agrupan

primero en RU. Si no hay repeticiones, los paquetes de datos se asignan consecutivamente en slots y se envían en subtramas NPDSCH.

En el caso de que haya repeticiones, el mapeo es similar al de uplink multitono, los datos de 2 slots se asignan primero en una subtrama, que se repite con el número total de repeticiones, con un límite superior de cuatro. Luego, el mapeo continúa de la misma manera hasta que se transmiten todas las subtramas. Finalmente, toda esta estructura se repite hasta que se alcanza el número deseado de repeticiones.

Hay una excepción cuando los datos de downlink contienen información SIB, en este caso, los slots se transmiten consecutivamente y luego todo este bloque se repite el número apropiado de veces.

El RRC puede configurar brechas de transmisión para las transmisiones NPDSCH con un gran número de repeticiones. El mensaje RRCConnection-Reconfiguration proporciona la información de cuál será el número de repeticiones para desencadenar tales brechas, la periodicidad y la duración de sus incidencias. Cuando se produce la brecha, la transmisión NPDSCH se pospone a la siguiente subtrama disponible después de la brecha. Estas brechas no se aplican a los NPDSCH que llevan información MIB o SIB.

### 3.2.7 Características en términos de factores IoT

Los casos de uso de IoT se caracterizan por requisitos como la tasa de datos, la latencia, cobertura, duración de la batería, la complejidad del dispositivo y la capacidad. Estas son importantes métricas de rendimiento, factores que se deben considerar para elegir la tecnología apropiada para IoT.

#### **Tasas de datos y latencia**

Para cumplir con los requisitos de capacidad, NB-IoT debe multiplexar muchos dispositivos simultáneamente y proporcionarles conectividad de manera eficiente, independientemente de la calidad de la cobertura.

La velocidad de datos alcanzable depende de la calidad del canal (SNR) y de la cantidad de recursos asignados (ancho de banda). En el enlace descendente, todos los dispositivos comparten el mismo budget de energía y varios pueden recibir simultáneamente las transmisiones de los eNB. En el uplink, cada dispositivo tiene su propio budget de energía, pero el tráfico generado por varios dispositivos se puede multiplexar, siendo mayor su potencia combinada.

En muchos lugares, los dispositivos NB-IoT están limitados por la intensidad de la señal en lugar del ancho de banda, dichos dispositivos pueden concentrar su energía en un ancho de banda más estrecho y liberar el ancho de banda para otros, aumentando la capacidad del sistema sin pérdida de rendimiento.

Para habilitar tales asignaciones de ancho de banda pequeño, NB-IoT usa subportadoras (5kHz) en lugar de bloques de recursos (180kHz). Cada dispositivo está programado subportadoras en el enlace ascendente pudiendo disminuir el espaciado de éstas a 3.75 kHz. Sin embargo, al hacerlo habrá que asignar algunos recursos para evitar la interferencia entre las subportadoras en lugar de utilizarlas para el tráfico, lo que supondría un menor rendimiento.

También es posible aumentar la velocidad de datos agregando más ancho de banda, por ejemplo, en el uplink, las velocidades de datos se pueden aumentar hasta 12 veces asignando dispositivos con multitono en lugar de un solo tono.

NB-IoT ha sido diseñado con una buena multiplexación y velocidades de datos adaptables, por lo que podrá cumplir con los requisitos de capacidad previstos. El objetivo de capacidad en 3GPP TR 45.820 [1] se ha establecido 52500 dispositivos por celda y las simulaciones muestran soporte para 200000.

### **Cobertura**

El área que una red móvil puede cubrir depende de la densidad del sitio y del budget del enlace. NB-IoT logra una pérdida de acoplamiento (MCL) máxima 20 dB más alta que GPRS, además, ya que los casos de uso suelen operar con tasas de datos más bajas, la extensión de la cobertura se logra cambiando la velocidad de los datos al aumentar el número de repeticiones.

Por lo tanto, el budget de enlace mejorado le permite llegar a dispositivos IoT en ubicaciones desafiantes, que no se pueden alcanzar usando otros sistemas.

La mejora de 20dB corresponde a un aumento de siete veces en el área de cobertura para un entorno abierto, o aproximadamente la pérdida que se produce cuando una señal penetra en la pared exterior de un edificio.

Las actividades de estandarización de 3GPP han demostrado que NB-IoT cumple con el objetivo de budget de enlace de 164dB, al mismo tiempo que cumple con los requisitos de la aplicación MTC para velocidad de datos, latencia y duración de la batería.

### **Duración de la batería**

La duración de la batería de los dispositivos depende de la tecnología utilizada en la capa física para transmitir y recibir datos, y, en mayor medida, de la eficiencia con la que el dispositivo utilice modos de inactividad y suspensión. La especificación NB-IoT aborda ambos aspectos.

En RRC\_idle, los dispositivos ahorran energía y recursos para enviar informes de medición, y las señales de referencia de enlace ascendente se liberan.

Mediante la recepción discontinua (DRX) las redes y los dispositivos negocian cuando pueden dormir los dispositivos y puede aplicarse en los dos estados RRC. En RRC\_connected, la aplicación de DRX reduce la cantidad de informes de medición que envían los dispositivos y la cantidad de veces que se monitorean los canales de control del uplink, lo que lleva a ahorros de batería.

Cuando se introdujo PSM (Power Save Mode) en la Rel-12, permitió que los dispositivos en RRC\_idle ingresaran a un modo de suspensión profunda en el que no se escuchan los paging, ni se realizan mediciones relacionadas con la movilidad. PSM y eDRX se complementan entre sí y logran una vida útil de la batería superior a 10 años.

### **Aspectos del dispositivo**

NB-IoT logra implementar UE de baja complejidad mediante los siguientes diseños:

- Los dispositivos NB-IoT admiten reducidos picos de tasas de datos de capa física (100-200 kbps o más bajo para dispositivos de un solo tono).
- Reducción significativa del tamaño máximo de bloques de transporte.
- Admite solo una versión de redundancia en el enlace descendente.

- Soporta solo transmisiones de flujo simple (single-stream).
- El UE solo necesita una única cadena de receptores.
- Soporta solo un proceso HARQ único.
- Los turbo-códigos se reemplazan por los códigos convolucionales para downlink, así que no se necesita un decodificador turbo en el UE.
- No se requiere medición de movilidad en modo conectado.
- Baja tasa de muestreo debido a un menor ancho de banda del UE.
- Permite solo la operación half-duplex, por lo que el filtro dúplex en el dispositivo puede reemplazarse por un simple interruptor, y se requiere un único oscilador local para la generación de frecuencia.
- No se requiere procesamiento paralelo.
- La banda estrecha reduce la complejidad de la conversión analógico digital y viceversa, el almacenamiento en búfer y estimación de canales.
- Se puede utilizar un amplificador de potencia integrado en el UE, en lugar de ser un componente externo.

### **Reutilización de la tecnología existente**

NB-IoT emplea los mismos principios de diseño que LTE, aunque utiliza una nueva portadora, canales nuevos y procedimientos de acceso aleatorio para cumplir con los requisitos de los casos de uso de IoT. De esta manera aprovecha el alcance global de LTE, las economías de escala y el ecosistema líder en la industria.

NB-IoT puede proporcionar despliegue tanto in-band como en guard-band sin causar interferencia entre sus portadoras y las utilizadas por LTE, haciendo de NB-IoT una solución de IoT bien integrada para operadores centrados en LTE. La arquitectura 3GPP existente proporciona una solución global y de conectividad altamente automatizada para implementaciones IoT a gran escala. NB-IoT y LTE se ejecutan como una red única que transporta tráfico MBB y MTC, lo que reduce los costos operativos en áreas como aprovisionamiento, monitoreo, facturación y administración de dispositivos. Al igual que en las redes LTE actuales, NB-IoT admite el estado del arte de seguridad 3GPP, con autenticación, protección de señalización y encriptación de datos.

### **Capacidad**

NB-IoT admite una capacidad masiva de IoT utilizando solo un PRB tanto en el enlace ascendente como en el descendente. Hay que tener en cuenta que, para un UE con cobertura limitada, la asignación de mayor ancho de banda no es espectralmente eficiente, ya que el UE tendría una potencia limitada. Basado en el modelo de tráfico en [1], NB-IoT con un PRB soporta más de 52.500 UE por celda [1] y, además, soporta múltiples operaciones de portadora. Por lo tanto, se puede agregar más capacidad de IoT agregando más portadoras de NB-IoT.

## **3.3 Comparativa entre tecnologías LPWAN**

### **3.3.1. Diferencias técnicas**

A continuación, se detallan las principales características técnicas de las tecnologías LPWAN desarrolladas en apartados anteriores. Estas tecnologías, que lideran el sector, poseen características bastante diferenciadas entre ellas, como se puede observar en la siguiente tabla:

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Espectro	No licenciado (ISM)	No licenciado (ISM)	Licenciado
Frecuencia	EU 868 MHz US 915 MHz	EU 868 MHz US 915 MHz	Bandas de frecuencia LTE
Modulación	UL: UN DBPSK DL: GFSK	CSS	OFDMA (UL) SC-FDMA (DL)
Ancho de banda	100 Hz	250 kHz y 125 kHz	200 kHz
Máx. velocidad de datos	EU: 100 bps US: 600 bps	50 kbps	UL: 200 kbps DL: 250 kbps
Bidireccionalidad	Limitada/Half duplex	Si/Half duplex	Si/Half duplex
Máx. mensajes/día	UL: 140 DL: 4	Ilimitado	Ilimitado
Máx. payload	UL: 12 bytes DL: 8 bytes	243 bytes	1600 bytes
Rango	Urbano: 10 km Rural: 40 km	Urbano: 5 km Rural: 20 km	Urbano: 1 km Rural: 10 km
Inmunidad a interferencias	Muy alta	Muy alta	Baja
Autenticación y encriptación	No soportada	Sí, AES 128b	Si, encriptación LTE
Tasa de datos adaptativa	No	Sí	No
Handover	Los dispositivos finales no se suscriben a una única estación base	Los dispositivos finales no se suscriben a una única estación base	Los dispositivos finales se suscriben a una única estación base
Localización	Sí, RSSI	Sí, RDOA	No (bajo especificación)
Permite red privada	No	Sí	No
Estandarización	La compañía Sigfox colabora con ETSI en la estandarización de la red basada en Sigfox	LoRa-Alliance	3GPP

Tabla 12. Comparativa entre características técnicas de LoRa, Sigfox y NB-IoT

### 3.3.2 Diferencias en términos IoT

#### Calidad de servicio (QoS)

LoRa y Sigfox pueden manejar la interferencia, el multi-camino y el desvanecimiento (fading), pero no pueden ofrecer la misma QoS que puede proporcionar NB-IoT, ya que éste emplea un espectro con licencia y un protocolo síncrono basado en LTE, que son óptimos para QoS a costa del coste, las subastas de espectro LTE con licencia superan los 500 millones de euros por MHz [20]. Debido a la QoS y a los costes, NB-IoT se prefiere para aplicaciones que requieren una calidad de servicio garantizada, mientras que las aplicaciones que no tienen esta restricción elegirían LoRa o Sigfox.

#### Latencia y duración de la batería

En Sigfox, LoRa y NB-IoT, los UE están en modo de suspensión la mayor parte del tiempo fuera de la operación, lo que reduce la cantidad de energía consumida, esto supone una larga vida útil de los UE. Sin embargo, los UE NB-IoT consumen energía adicional debido a la comunicación síncrona y el manejo de la QoS, además, sus modos de acceso OFDM/FDMA requieren más corriente de pico; este consumo de energía adicional reduce la vida útil del UE NB-IoT en comparación con Sigfox y LoRa.

Sin embargo, NB-IoT ofrece la ventaja de una baja latencia. A diferencia de Sigfox, la clase C de LoRa maneja también la latencia bidireccional a expensas de un mayor consumo de energía. Por lo tanto, para las aplicaciones que son insensibles a la latencia y que no envían una alta cantidad de datos, Sigfox y LoRa clase A son las mejores opciones. Para las aplicaciones que requieren baja latencia, NB-IoT y la clase C de LoRa son las mejores opciones.

### **Escalabilidad y tamaño de carga útil (payload)**

Soportar gran cantidad de dispositivos es una de las características clave de Sigfox, LoRa y NB-IoT, estas tecnologías funcionan bien con la creciente cantidad y densidad de dispositivos conectados. Se consideran varias técnicas para hacer frente a esta característica de escalabilidad, como la explotación eficiente de la diversidad en un canal, así como en el tiempo y el espacio. Sin embargo, NB-IoT ofrece la ventaja de una escalabilidad muy alta, mayor que Sigfox y LoRa, permite una conectividad de hasta 100.000 UE por celda en comparación con los 50.000 para Sigfox y LoRa.

Sin embargo, NB-IoT también ofrece la ventaja de longitud máxima de payload, permite la transmisión de datos de hasta 1600 bytes, mientras que LoRa permite enviar un máximo de 243 bytes de datos y Sigfox tiene la longitud de carga útil más baja, 12 bytes, lo que limita su utilización en aplicaciones de IoT que necesitan enviar datos de gran tamaño.

### **Cobertura de red y rango**

La principal ventaja de utilización de Sigfox es que una sola estación base puede cubrir una ciudad entera (rango mayor a 40 km). En Bélgica, un país con una superficie total de aproximadamente 30.500 km<sup>2</sup>, el despliegue de la red Sigfox cubre todo el país con solo siete estaciones base [20].

LoRa tiene un rango más bajo (<20 km), necesitando solo tres estaciones base para cubrir una ciudad entera como Barcelona. Mientras que NB-IoT tiene el rango y las capacidades de cobertura más bajas. Esta tecnología se centra principalmente en la clase de dispositivos que se instalan en lugares alejados del alcance típico de las redes celulares (como interiores profundos). Además, el despliegue de NB-IoT se limita a estaciones base LTE, por lo tanto, no es adecuado para regiones rurales o suburbanas que no se benefician de la cobertura de LTE.

### **Modelo de despliegue**

Las especificaciones de NB-IoT fueron lanzadas en junio de 2016 necesitándose algún tiempo para el establecimiento de su red (actualmente en proceso). Sin embargo, los ecosistemas de Sigfox y LoRa están maduros y bajo comercialización en varios países y ciudades. LoRa puede implementarse actualmente en 51 países y Sigfox en 54 [40], [41].

Una ventaja del ecosistema LoRa es su flexibilidad, a diferencia de Sigfox y NB-IoT, ofrece una implementación de red local (LAN) que utiliza la puerta de enlace LoRa, así como una operación de red pública a través de estaciones base. En el campo industrial, se podría usar un modelo operativo híbrido con una red local LoRa en áreas de fábrica y la red pública LoRa para cubrir las áreas externas. En los casos de Sigfox y NB-IoT, el proveedor de servicios IoT no tendría que soportar los costes de despliegue de estaciones base, ya que en ambos casos hay operadoras que han hecho un despliegue previo.

### Coste

En cuanto al coste, hay que analizar varios aspectos como el coste del espectro (licencia), coste de despliegue de la red y coste de los dispositivos. En la siguiente tabla se muestra los costes de LoRa, Sigfox y NB-IoT:

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Espectro	Gratis	Gratis	>500M€/MHz
Despliegue	>4000€/estación base	>100€/Gateway >1000€/estación base	>15000€/estación base
Dispositivo	<2€	3-5€	>20€

Tabla 13. Comparación de costes de LoRa, Sigfox y NB-IoT

Resumen de las diferencias en términos IoT de cada una de las tecnologías:

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
QoS	Media	Media	Muy alta
Rendimiento de latencia	Baja	Media	Alta
Duración de batería	Hasta 10 años	Hasta 10 años	Hasta 10 años
Escalabilidad	Baja	Baja	Alta
Despliegue	54 países	51 países	En proceso
Coste	Véase tabla 13		

Tabla 14. Comparativa entre características IoT de LoRa, Sigfox y NB-IoT

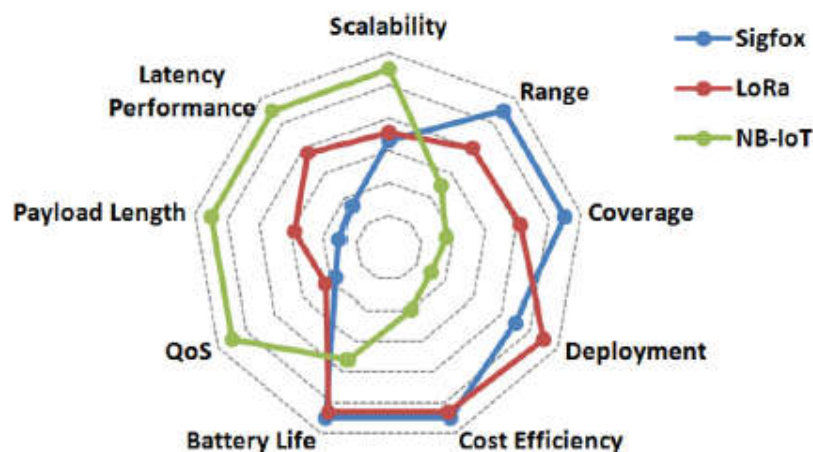


Figura 36. Ventajas de Sigfox, LoRa y NB-IoT en términos de factores IoT [36]

LoRa presenta ventajas en términos de duración de la batería, capacidad y coste; mientras que NB-IoT ofrece beneficios en términos de QoS, latencia, confiabilidad y rango; y Sigfox en términos de cobertura.



## 4. Ventajas y desventajas de cada sistema y casos de uso

Los factores IoT y las diferencias técnicas de NB-IoT, Sigfox y LoRa determinan si son factibles o no para aplicaciones específicas, ya que no serán igualmente válidas para todas las aplicaciones de IoT, en este apartado se procederá a realizar un estudio de casos de uso comunes de varias aplicaciones y que tecnología encaja mejor con sus especificaciones.

### ➤ Mediciones eléctricas

Las compañías eléctricas suelen necesitar comunicaciones frecuentes, baja latencia y alta tasa de datos; además, normalmente, el consumo de energía es bajo y no se necesitan baterías de larga duración ya que tienen una fuente continua de energía. En muchos casos se necesita una monitorización en tiempo real para poder tomar decisiones inmediatas, como cargas, cortes o interrupciones del servicio.

Debido a la necesidad de baja latencia, Sigfox no es apropiado para esta aplicación, mientras que utilizando la clase C de LoRa se puede asegurar una latencia muy baja, pero la mejor opción sería NB-IoT porque además de esta característica, también se requiere una alta tasa de datos y comunicación frecuente. A esto hay que añadirle que los medidores eléctricos suelen encontrarse en ubicaciones fijas en áreas urbanas, por lo que es fácil asegurar la cobertura NB-IoT por operadores de telefonía móvil (LTE).

### ➤ Aplicaciones agrícolas

En la agricultura es esencial que la duración de la batería de los sensores sea lo mayor posible, puesto que lo habitual es que se encuentren dispersados en áreas amplias y sin fuente de energía eléctrica cerca. Mientras que la latencia no juega un papel importante, ya que en estos casos los dispositivos actualizan las mediciones pocas veces, ya que las condiciones medioambientales no sufren cambios radicales.

Sigfox y LoRa son las tecnologías ideales para esta aplicación, NB-IoT quedaría descartada, no solo por suponer una menor duración de la batería de los dispositivos, sino también porque muchas zonas agrícolas no tienen cobertura LTE.

### ➤ Automatización industrial

La monitorización de maquinaria previene las caídas de líneas de producción industrial y permite el control en remoto para mejorar la eficiencia.

En el uso industrial hay múltiples aplicaciones, por lo que se necesitan diferentes tipos de sensores y de comunicaciones, algunas de las aplicaciones necesitan comunicaciones frecuentes y servicio de alta calidad, por lo que NB-IoT sería mejor solución que LoRa y Sigfox; mientras que otras requieren sensores de bajo coste y larga duración de batería para el seguimiento de activos y monitorización de estados, en estos casos LoRa y Sigfox sería la solución más adecuada. También podrían usarse soluciones híbridas por la amplia variedad de requerimientos que se podría tener en una misma fábrica.

➤ Edificios inteligentes

Sensores de temperatura, humedad, seguridad, flujo de agua y de electricidad son algunos de los que pueden utilizarse en edificios para la prevención de daños y la respuesta inmediata a las necesidades en el edificio.

Es importante que estos sensores sean de bajo coste y que las baterías sean de larga duración, además, no se requiere una alta calidad de servicio ni de comunicaciones frecuentes, por lo tanto, las tecnologías que mejor encajan son Lora y Sigfox.

➤ Terminales de punto de venta

Los sistemas de puntos de ventas requieren garantía de calidad de servicio al manejar comunicaciones frecuentes, estos sistemas tienen fuente de alimentación continua, por lo que la duración de la batería no es una característica a valorar. En estas aplicaciones tiempos largos de latencia limitarían el número de transacciones que una tienda puede hacer. Por ello, NB-IoT sería la tecnología más apropiada.

➤ Seguimiento para logística

El seguimiento para determinar la localización y condiciones apropiadas de los bienes son altamente deseables en logística. En esta aplicación, la mayoría de requerimientos buscados son el bajo coste de los dispositivos y una gran duración de la batería.

Las compañías logísticas habitualmente tienen su propia red, que asegura la cobertura en sus instalaciones y los dispositivos de bajo coste IoT pueden ser fácilmente desplegados en sus vehículos, por ello, las estaciones Sigfox o LoRa pueden usarse cuando los vehículos se encuentran fuera de las instalaciones o cuando los bienes llegan a las localizaciones del cliente. Sin embargo, LoRa permite comunicaciones más fiables que Sigfox cuando están en movimiento a alta velocidad. En el caso de NB-IoT, la red LTE podría no estar disponible en todas las localizaciones logísticas, como en áreas rurales. Por ello y debido al bajo coste, la gran duración de las baterías y la confiabilidad de las comunicaciones, LoRa es la tecnología más apropiada para esta aplicación.

# 5. Simulación del comportamiento de las diferentes tecnologías

## 5.1 Análisis de los casos de estudio

Se ha tratado ampliamente la tecnología NB-IoT, un nuevo sistema que pretende adaptar las redes móviles existentes a las demandas y necesidades de los dispositivos que integran el internet de las cosas, proporcionando conectividad sin intermediarios a los dispositivos. De esta forma, surge la posibilidad de nuevos escenarios y gran cantidad de nuevos casos de uso, servicios y dispositivos. Esto supone nuevos retos para fabricantes de dispositivos y operadores, con necesidad de verificar los diseños, asegurar la interoperabilidad de los diferentes sistemas, la estabilidad de los dispositivos, así como comprobar el consumo de potencia y durabilidad de las baterías, entre otros.

Para un desarrollo eficaz de la tecnología en escenarios reales, así como, para proponer evoluciones futuras, es importante entender cómo se comporta ante diferentes situaciones y poder ajustar los modelos, caracterizando la configuración de red, según las condiciones en las que se encuentren los servicios que pudieran hacer uso del mismo.

NB-IoT destaca frente a LoRA y Sigfox, por sus opciones de despliegue, calidad de servicio, rendimiento de latencia y mejora de cobertura. Una característica clave de NB-IoT es su capacidad de cobertura en zonas recónditas como sótanos o interiores de edificios. No se ha encontrado en la literatura consultada modelos de simulación que estudien esta característica frente a otras tecnologías LPWAN, por ello el modelo desarrollado pretende simular el comportamiento de los estándares LoRa, Sigfox y NB-IoT en diferentes escenarios, con el objetivo de mostrar su capacidad de cobertura en las condiciones expuestas.

Con la finalidad de extraer conclusiones con aportaciones útiles para futuras aplicaciones, se realiza la simulación de las pérdidas de señal en escenarios interesantes para aplicaciones en el contexto IoT:

- Escenario basado en un área de extensión abierta en el que existe visión directa (LOS), como puede ser el caso de la monitorización en el área de la agricultura o ganadería.
- Escenario basado en entornos urbanos, en el que no existe la condición de visión directa (NLOS), donde las condiciones de propagación de las señales son poco favorables; este es un entorno típico de aplicaciones de monitorización de Smart Cities.

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

$$MCL(dB) = P_{Tx} - (Noise Figure + SINR + Noise Floor)$$

Ecuación 3. MCL (Pérdidas máximas de acoplamiento)

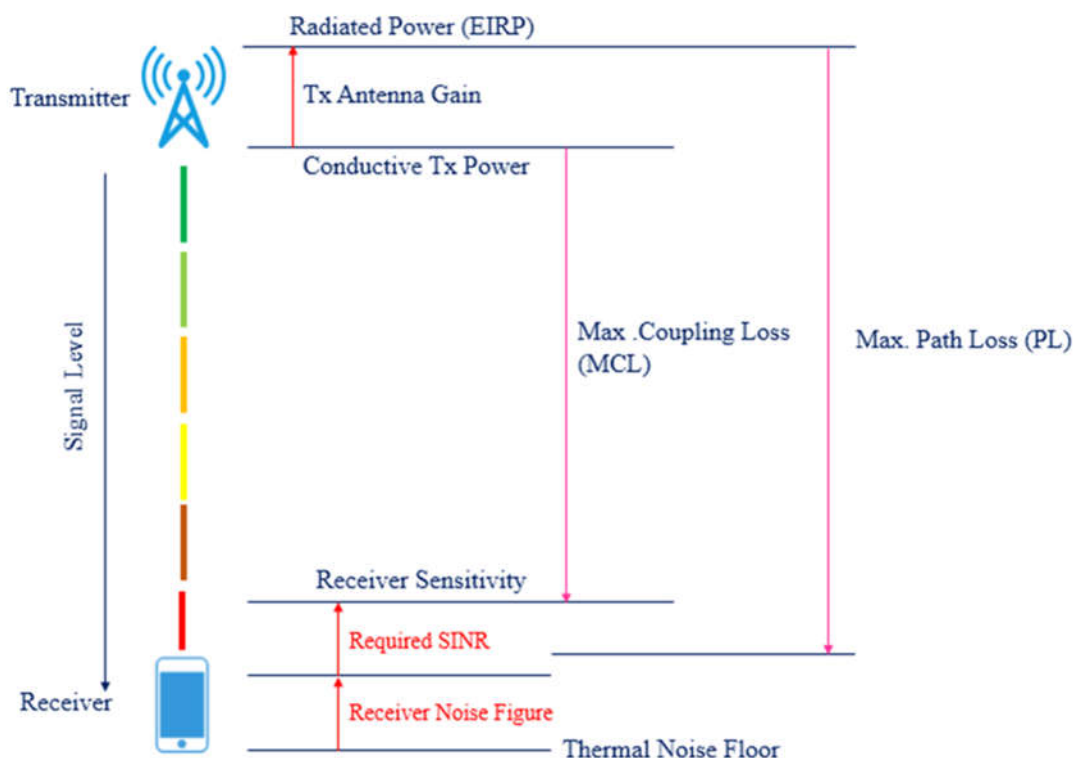


Figura 37. Maximum Coupling Loss (MCL) [53]

Las pérdidas de acoplamiento (MCL) máximas soportadas por las diferentes tecnologías de acceso radio son las siguientes:

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

Tabla 15. MCL de las diferentes tecnologías LPWAN

Para mostrar la capacidad de cobertura se procede al desarrollo de una simulación de estas tecnologías LPWAN (estudiadas en la presente memoria) mediante el uso de la herramienta de software matemático Matlab, con el fin de realizar la evaluación del rendimiento y, con ello, validar los distintos sistemas mediante la comparación de las pérdidas obtenidas en la simulación y los valores esperados según las especificaciones de cada una de las mencionadas tecnologías.

## 5.2 Métodos de cálculo

### Cálculo del enlace

Para este análisis de la cobertura de los sistemas, se utilizará el modelo de Okumuram-Hata, éste es un modelo empírico para un rango de frecuencias entre 150 MHz y 1.5 GHz, margen dentro del que se encuentran los 3 sistemas en estudio

Este modelo permite estimar las pérdidas básicas de propagación, con diversos factores de corrección en función del entorno. Los valores del entorno urbano han sido estandarizados por la ITU y definen la predicción de pérdidas mediante categorías de clutter y de escenarios, recogidas tal que:

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

Las pérdidas de trayecto se calculan como expone la siguiente expresión:

$$\Delta = 69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_t) - ((1.1 \cdot \log_{10}(f_c) - 0.7) \cdot h_r - 1.56 \cdot \log_{10}(f_c) - 0.8) + (44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_t)) \cdot \log_{10}(d) - C$$

Ecuación 4. Pérdidas de trayecto Okumuram-Hata

$f_c$ : frecuencia de portadora.

$h_t$ : altura efectiva de la antena de la estación base

$h_r$ : altura efectiva de la antena del terminal

$d$ : distancia entre la estación base y el terminal en km

$C$ : factor de compensación medioambiental, que se expresa como sigue:

$$C = \begin{cases} 0, & \text{urbano} \\ -2 \cdot (\log_{10}(f_c/28))^2 - 5.4, & \text{suburbano} \\ -4.78 \cdot (\log_{10}(f_c))^2 + 18.33 \cdot \log_{10}(f_c) - 40.94, & \text{rural} \end{cases}$$

Ecuación 5. Factor de compensación medioambiental Okumuram-Hata

### Cálculo en espacios interiores

En cuanto al modelado para ambientes interiores, se utilizará el modelo propuesto por la ITU, ITU-R P.1238-9, "Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz" [52]. En esta recomendación, al considerar que se requieren modelos generales y asesoramiento para comenzar a planificar los sistemas y evaluar la interferencia, así como para elaborar modelos determinísticos, con el fin de realizar evaluaciones detalladas, se proporciona orientación sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz (rango de frecuencias que engloba las frecuencias implicadas en este estudio) y se brinda información sobre los modelos de pérdida de trayecto.

Se trata de un modelo exclusivo para la estimación de las pérdidas de propagación en ambientes interiores. De manera implícita, el modelo considera las pérdidas a través del mobiliario, puertas y paredes, a través del exponente de pérdidas  $n$  que depende del tipo de edificios (residencial, comercial, de oficinas, etc.). Así mismo, toma en cuenta, de forma explícita, las pérdidas a

través de pisos. En resumen, las pérdidas de propagación en el referido modelo se determinan a partir de:

$$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n)$$

Ecuación 6. Pérdidas de propagación UIT-R P.1238-9

N: coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia (ver tabla 18)

f: frecuencia (MHz)

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

$d_0$ : distancia de referencia (m)

$L(d_0)$ : pérdida en el trayecto en  $d_0$  (dB), para una distancia de referencia  $d_0$  a 1 m, y suponiendo propagación en el espacio libre  $L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28$ , donde f es en MHz

$L_f$ : factor de pérdida debida a la penetración en el suelo (dB) (ver tabla 19)

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

Los coeficientes de pérdida de potencia para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores, en las frecuencias que conciernen a este estudio son:

Frecuencia (MHz)	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica
800	22.5	22.5	20	21.1
900	22.5	33	20	21.1
1200	22.5	32	22	21.1
1900	28	30	22	21.1
2100	28	25.5	20	21.1
2200	28	20.7	20	33
2400	28	30	22	33
2600	28	44	22	33

Tabla 16. Coeficientes de pérdida de potencia N

Los factores de pérdida de penetración en el suelo,  $L_f$  (dB), con n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores son:

Frecuencia (MHz)	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900	$9+5(n-1)$	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	$9+5(n-1)$
1800-2000	$4n$	$15+4(n-1)$	$6+3(n-1)$
2400	10	14	14

Tabla 17. Factores de pérdida de penetración en el suelo  $L_f$  (dB)

## 5.3 Modelado de la simulación

### 5.3.1 Introducción

Conociendo los fundamentos teóricos de las tecnologías en estudio tratadas en la presente memoria, se realiza el desarrollo de una simulación de cobertura con la herramienta de software matemático Matlab, mediante el uso de su interfaz gráfica Guide. Para ello, se toma en consideración los efectos de propagación mediante el modelo Okumura-Hata, modelo de propagación básico para el

entendimiento del comportamiento en diferentes entornos (rural o área abierta, suburbano y urbano), y la recomendación UIT-R P.1238-9 que proporciona orientación sobre la propagación en interiores con el fin de realizar la evaluación del rendimiento. Este simulador tiene la funcionalidad de proveer de datos específicos del comportamiento de las tecnologías consideradas en determinadas condiciones. Con ello se pretende dar una conceptualización gráfica del comportamiento para validar las tecnologías, comparando los resultados obtenidos en la simulación y los valores de las especificaciones. Los parámetros básicos de cada tecnología, utilizados en la simulación se muestran a continuación:

Parámetro	NB-IoT	LoRa	Sigfox
Espectro (MHz)	800	868	868
	1800		
	2600		
Potencia máxima de transmisión (dBm)	23	14	14
MCL (dB)	164	157	160

Tabla 18. Parámetros tecnologías LPWAN

### 5.3.2 Estructura del programa

El software desarrollado se estructura en 3 interfaces gráficas (Menú Principal, Simulación de enlace y Simulación en Interior) programadas enteramente en Matlab, cuidando los detalles estéticos y de funcionalidad.

#### Menú Principal

La primera de las interfaces, “Menu\_Principal”, se muestra como presentación del simulador y se puede observar en la figura 38. Su función principal es dirigir a las interfaces del tipo de medida que se quiera realizar, simulación del enlace (espacio exterior) o simulación en espacios interiores.

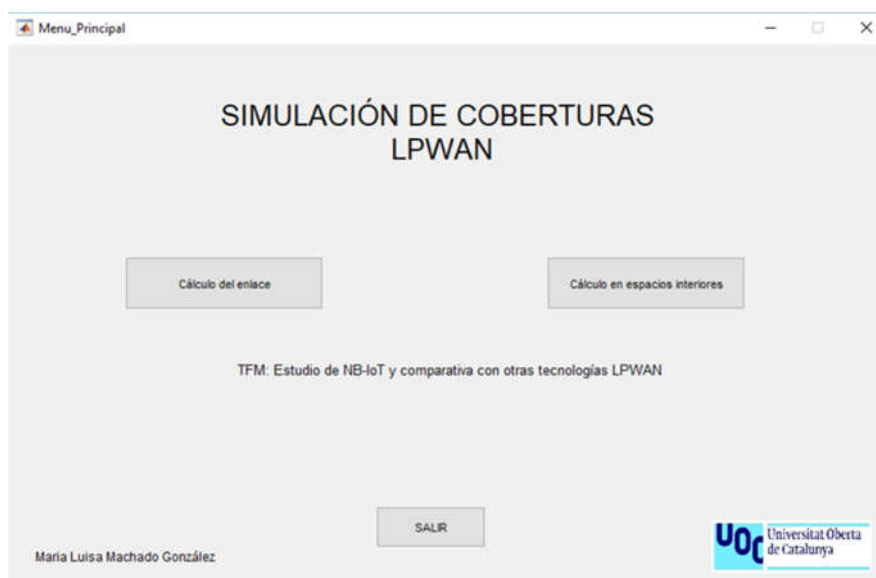


Figura 38. Interfaz Menú Principal

## Simulación de enlace

En la interfaz “Simulación” se pretende obtener la comparación entre las tecnologías para estudiar su comportamiento en diferentes ambientes, como son las ciudades grandes, ciudades pequeñas y ambientes rurales.

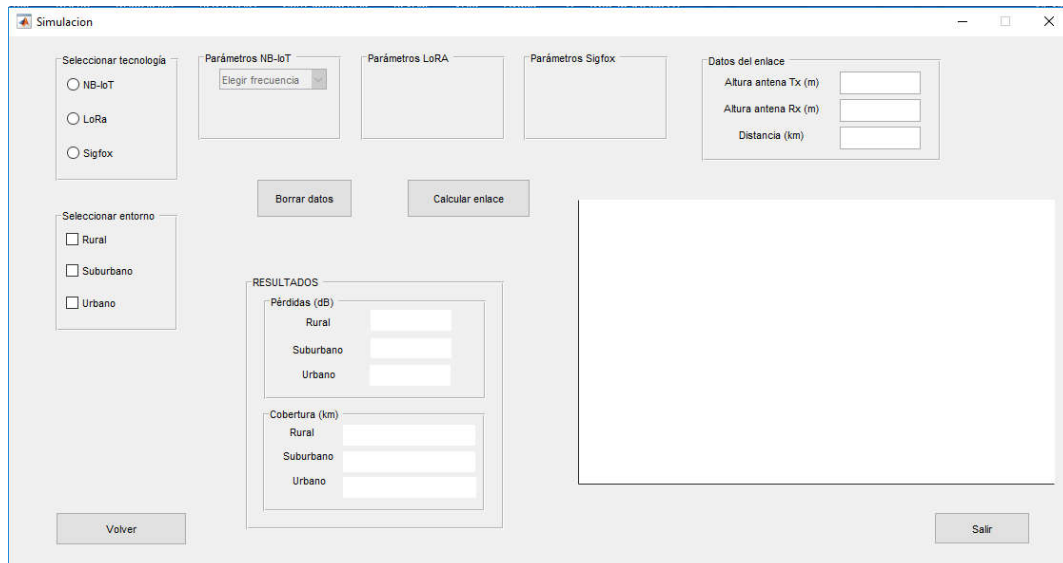


Figura 39. Interfaz Simulación del enlace

Para el mejor entendimiento de esta interfaz, se muestra su diagrama de flujo:

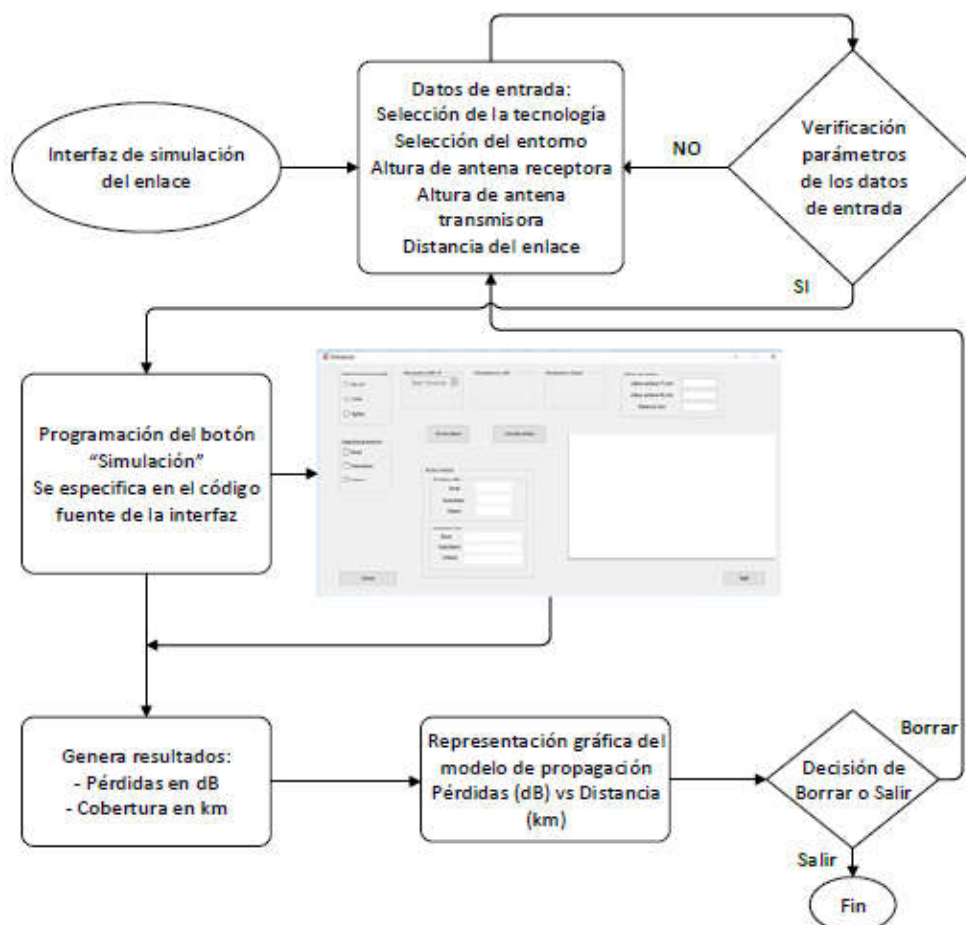


Figura 40. Diagrama de flujo de la interfaz Simulación del enlace



## Simulación en interior

En esta interfaz se obtiene el cálculo de las pérdidas y cobertura en espacios interiores de cada sistema, según se trate de un edificio residencial, edificio de oficinas, edificio comercial o una fábrica; además de tener en cuenta el entorno en el que se encuentra la edificación, que puede ser rural, suburbano o urbano.

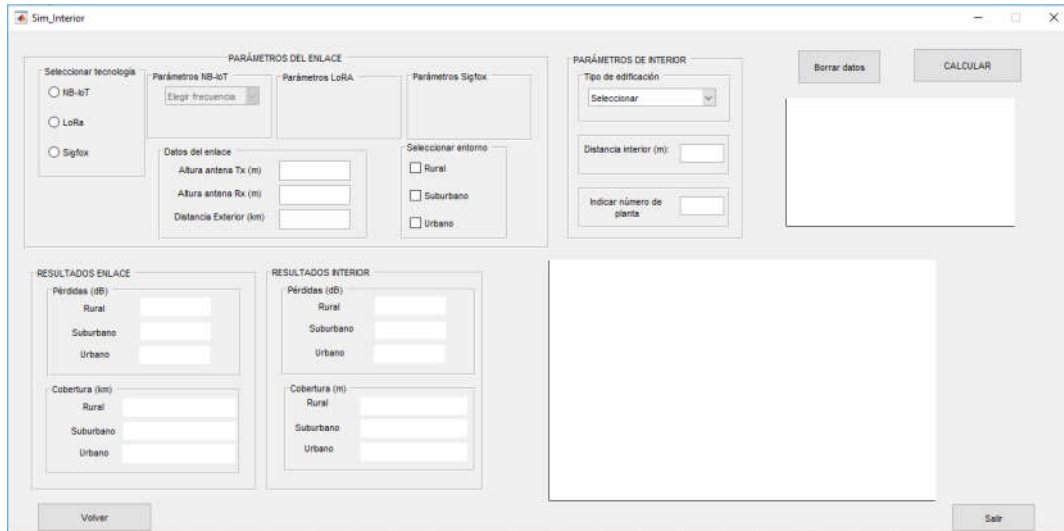


Figura 41. Interfaz Simulación en espacios interiores

El diagrama de flujo del funcionamiento de esta interfaz es el siguiente:

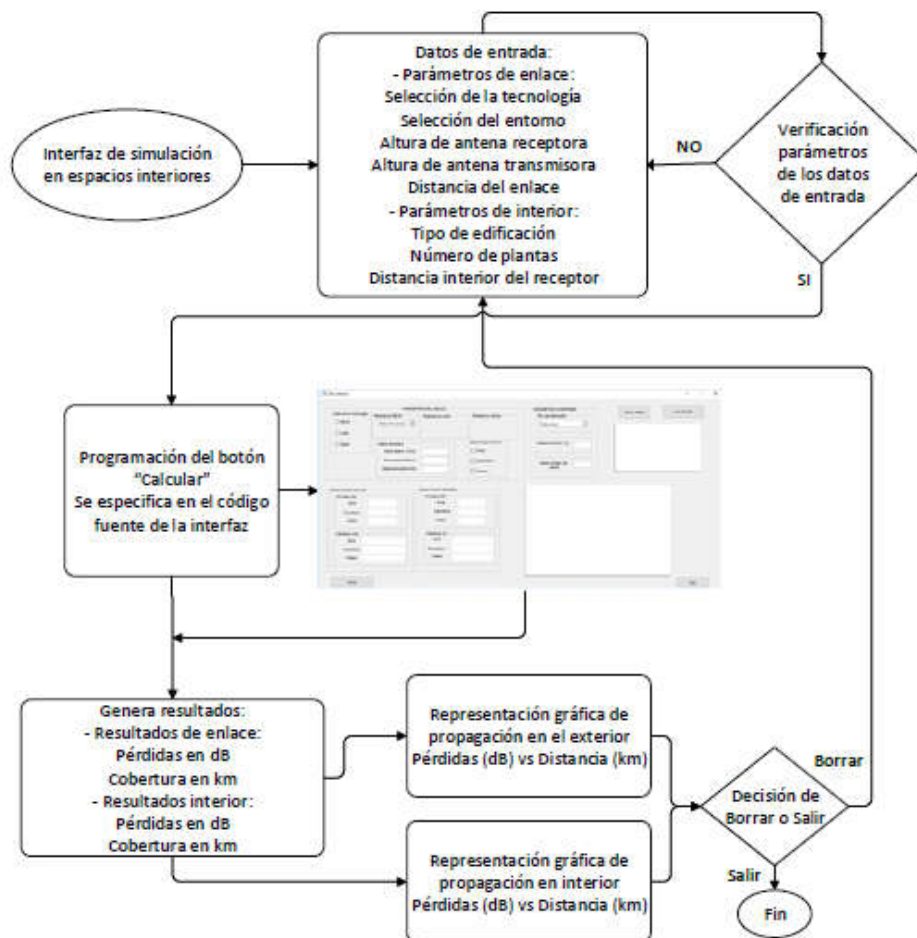


Figura 42. Diagrama de flujo de la interfaz Simulación en interiores

## 5.4 Comparación de resultados

### 5.4.1 En exteriores

Para simular situaciones en las que el despliegue ocurre en zonas de exterior, como monitorización agrícola o algunos casos de Smart City, se utilizará la interfaz de simulación del enlace. Para la simulación de cada una de los sistemas, se han utilizado los siguientes valores como parámetros de entrada:

<b>Altura de transmisor</b>	<b>30 m</b>
<b>Altura de receptor</b>	<b>1.5 m</b>
<b>Distancia</b>	<b>15 km</b>

Tabla 19. Parámetros de enlace de simulación en exterior

- NB-IoT: Además de los parámetros del enlace, se debe introducir la frecuencia de trabajo de NB-IoT, se ha escogido 800MHz, que es la más cercana a la de las otras tecnologías, de este modo se analiza el comportamiento en condiciones de mayor similitud.

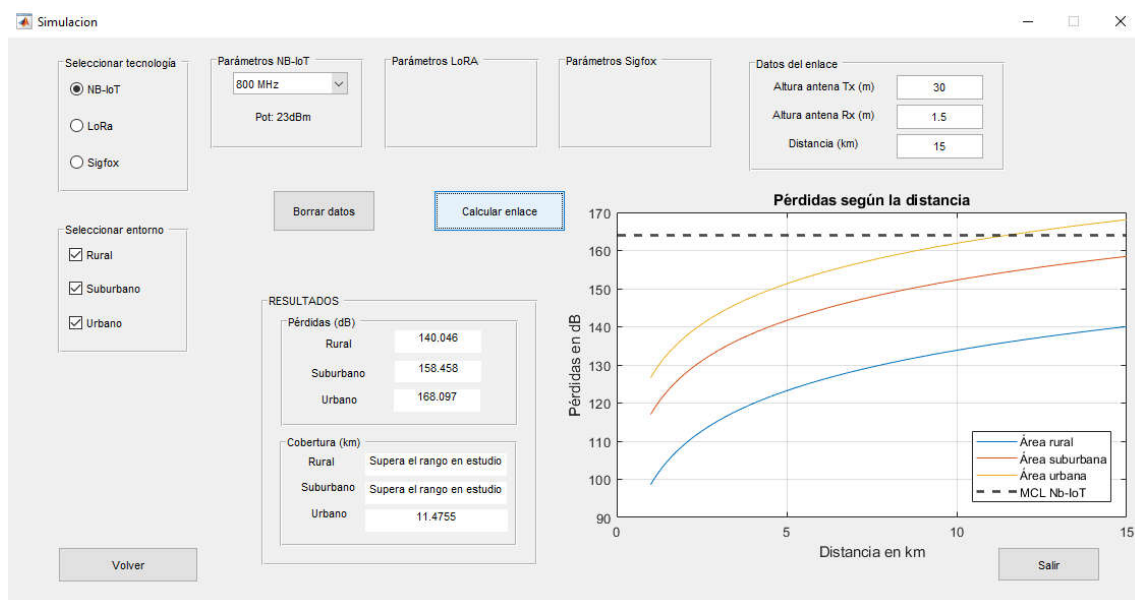


Figura 43. Comportamiento de NB-IoT en entorno urbano, suburbano y rural

En la figura 43 se representa el comportamiento de NB-IoT en zonas de exterior según el entorno. En el urbano se observan las mayores pérdidas, sin que se logre alcanzar la distancia ingresada de 15 km, ya que las pérdidas a esa distancia son de 168dB, la cobertura máxima es de 11.4 km. Mientras que, en áreas suburbanas y rurales, las pérdidas serían de 168 y 158.4dB respectivamente, en ambos casos la cobertura supera el rango en estudio (15km).

- LoRa:

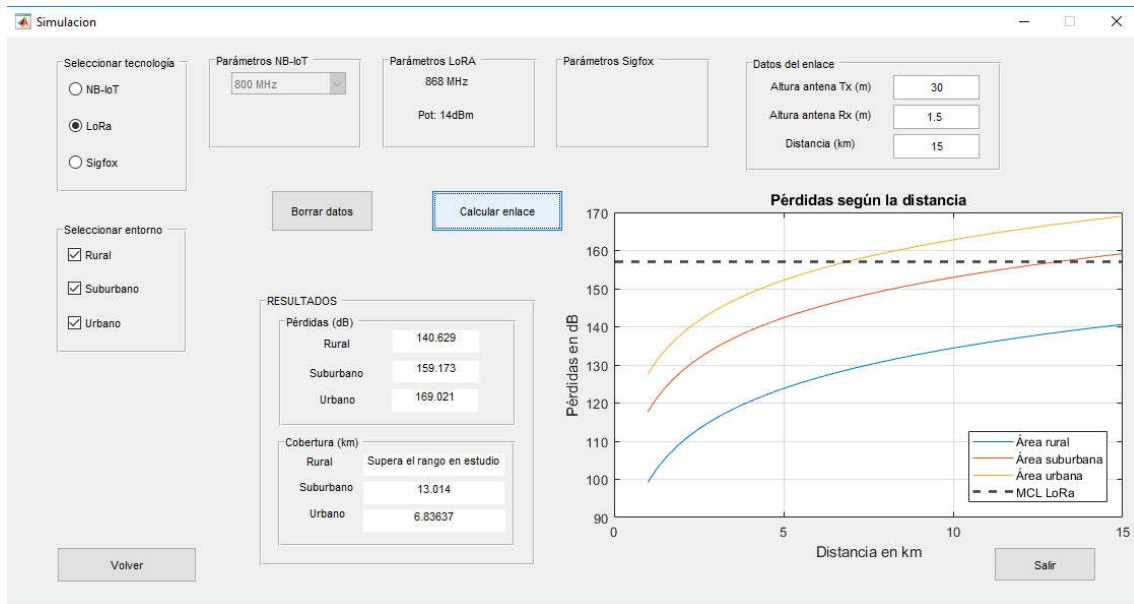


Figura 44. Comportamiento de NB-IoT en entorno urbano, suburbano y rural

En la figura 44 se representa el comportamiento de LoRa en ubicaciones de exterior en diferentes entornos. No se logra alcanzar la distancia de 15 km, ni en entorno urbano ni suburbano, siendo las pérdidas a esa distancia de 169 y 159.1dB, respectivamente; la cobertura máxima en estas situaciones es de 13km en suburbano y 6.8km en urbano. En zonas rurales, las pérdidas serían de 140.6dB, superando la cobertura la distancia de 15km.

➤ Sigfox:

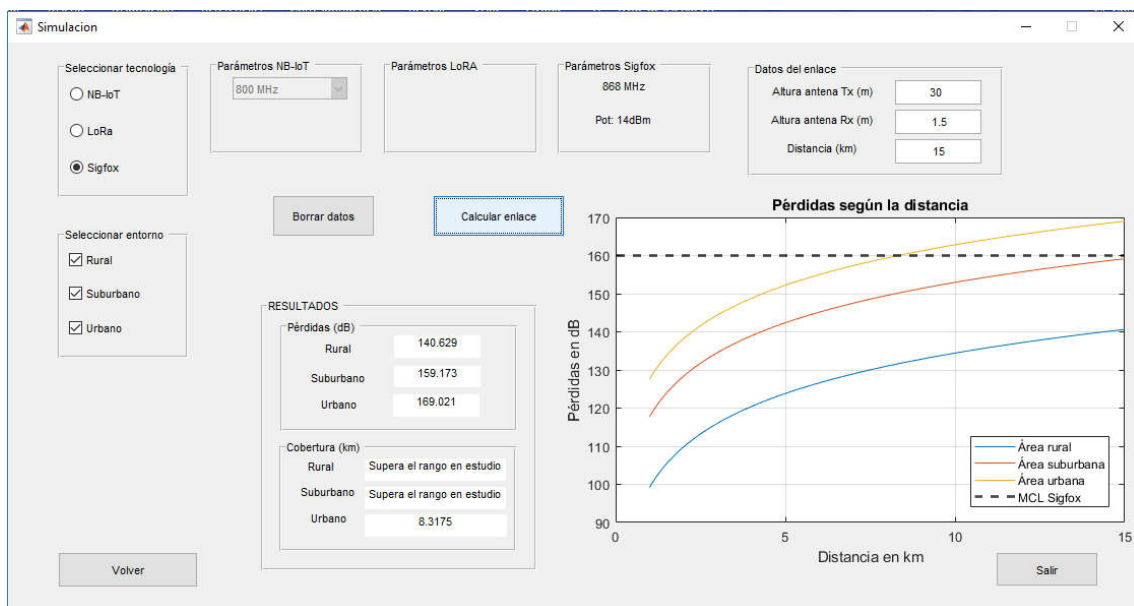


Figura 45. Comportamiento de Sigfox en entorno urbano, suburbano y rural

En la figura 45 se representa el comportamiento de NB-IoT en ubicaciones de exterior según el entorno. Tanto en la zona rural como suburbana se alcanza y supera la cobertura de 15 km. Las pérdidas en ambos casos son de 140.6 y 159.1dB respectivamente. En zona urbana, la cobertura solo alcanza los 8.3 km y las pérdidas a los 15km son de 169dB.

## 5.4.2 En interiores

Para simular situaciones en las que los sensores se encuentran en el interior de alguna edificación, como en la monitorización de procesos en fábricas o casos de Smart Home, se utilizará la interfaz de simulación en espacios interiores. Se han utilizado para ello los siguientes parámetros de entrada:

<b>Altura de transmisor</b>	<b>30 m</b>
<b>Altura de receptor</b>	<b>1 m</b>
<b>Distancia exterior</b>	<b>2 km</b>
<b>Tipo de edificación</b>	<b>Fábrica / Edificio residencial</b>
<b>Planta</b>	<b>Baja (0) / Sótano (-1)</b>
<b>Distancia interior</b>	<b>10m / 3m</b>

Tabla 20. Parámetros de simulación en espacios interiores

### ➤ NB-IoT:

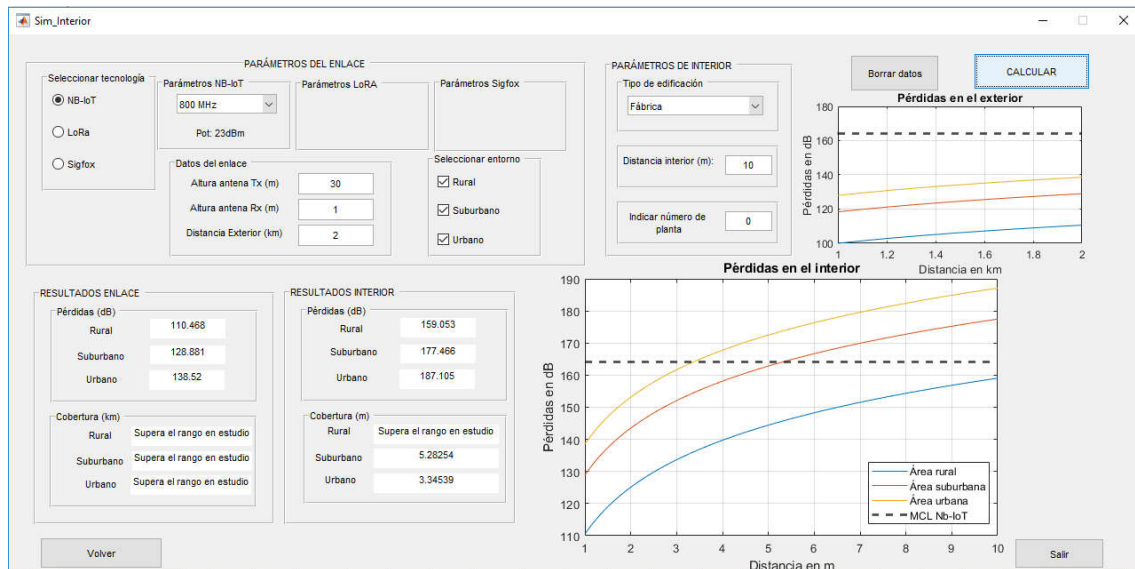


Figura 46. Comportamiento de NB-IoT en el interior de una fábrica

La figura 46 muestra el comportamiento de NB-IoT cuando los dispositivos están en el interior de una fábrica. Con los datos introducidos, solo se tendría una cobertura adecuada si la fábrica se encuentra en un entorno rural, siendo las pérdidas de 159 dB, superando la cobertura los 10 metros en el interior de la fábrica; mientras que en el caso de encontrarse en un entorno suburbano o urbano las pérdidas serían mayores, 177.4 y 187.1 dB respectivamente, llegando la cobertura en el interior solo a 5.28 y 3.34 metros respectivamente.

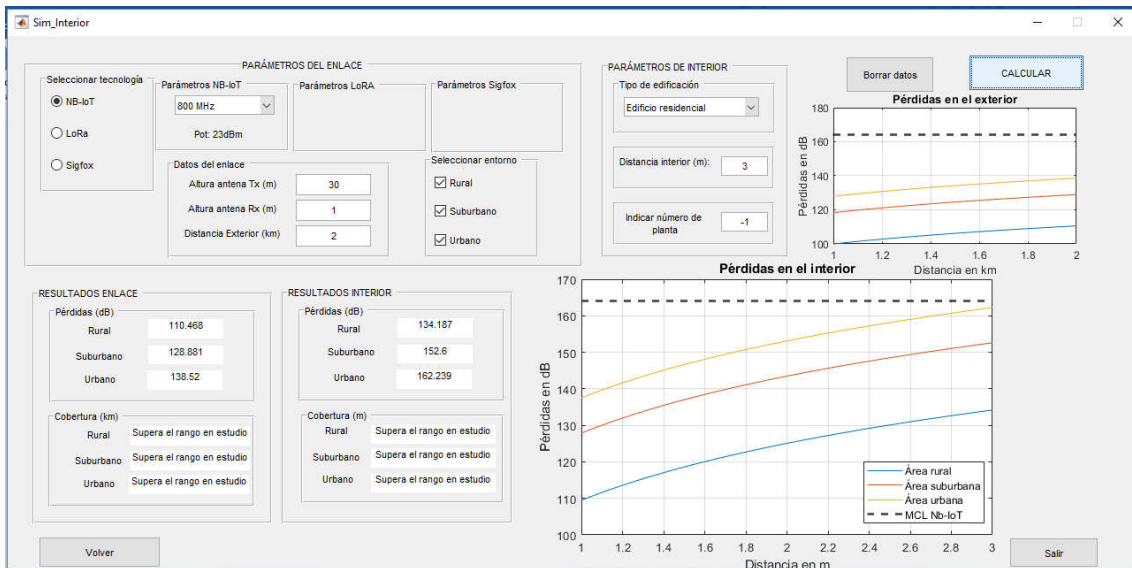


Figura 47. Comportamiento de NB-LoT en el sótano de una edificación residencial

La figura 47 muestra el resultado de NB-LoT con los dispositivos en el sótano de un edificio residencial. En este caso, la cobertura es adecuada para todos los entornos, superando la distancia interior de 3m introducida en la simulación. Las pérdidas para el caso de edificio en entorno urbano son de 162.2 dB, suburbano 152.6 dB y en entorno rural 134.1 dB.

➤ LoRa:

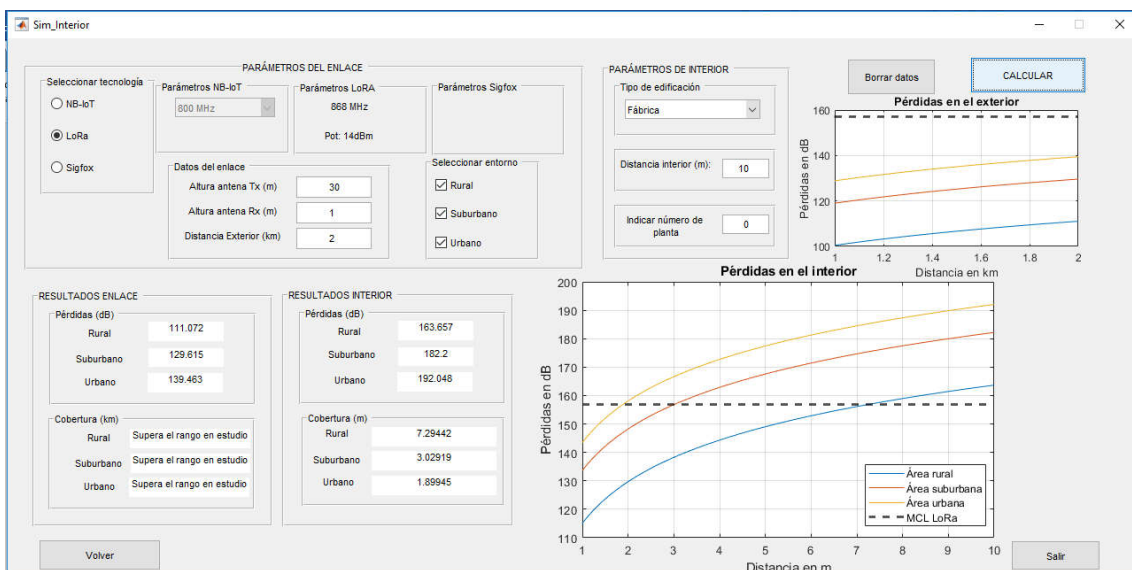


Figura 48. Comportamiento de LoRa en el interior de una fábrica

La figura 46 muestra el rendimiento de LoRa en el caso de ubicar los dispositivos en el interior de una fábrica. Se observa que la cobertura no llega a los 10 metros interiores de la fábrica, el mejor de los casos sería que ésta se encuentre en un entorno rural, donde la distancia máxima cubierta es de 7.2 metros, si se está en área suburbana o urbana, la distancia interior máxima es de 3 y 1.8 metros respectivamente.

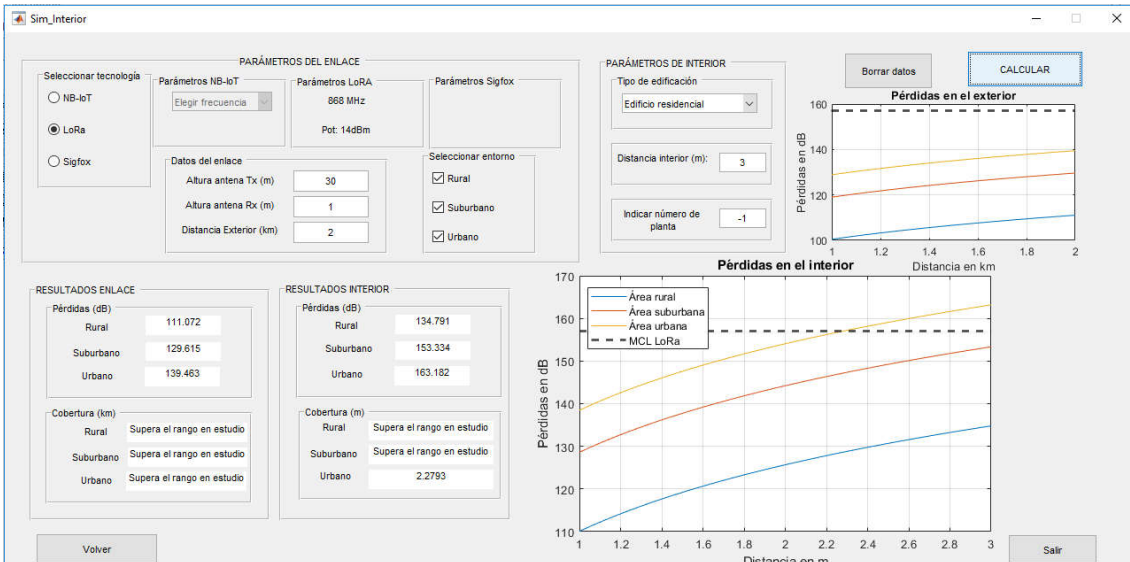


Figura 49. Comportamiento de LoRa en el sótano de una edificación residencial

En la figura 49 se muestra la simulación de Lora cuando los dispositivos están en el sótano de un edificio residencial. Se puede observar que se cumplen las condiciones de cobertura si la edificación se encuentra en un entorno rural o suburbano, pudiendo encontrarse el receptor a una distancia interior superior a los 3 metros. Sin embargo, si se ubica en un entorno urbano, la distancia máxima en el interior del sótano sería de 2.2 metros.

➤ Sigfox:

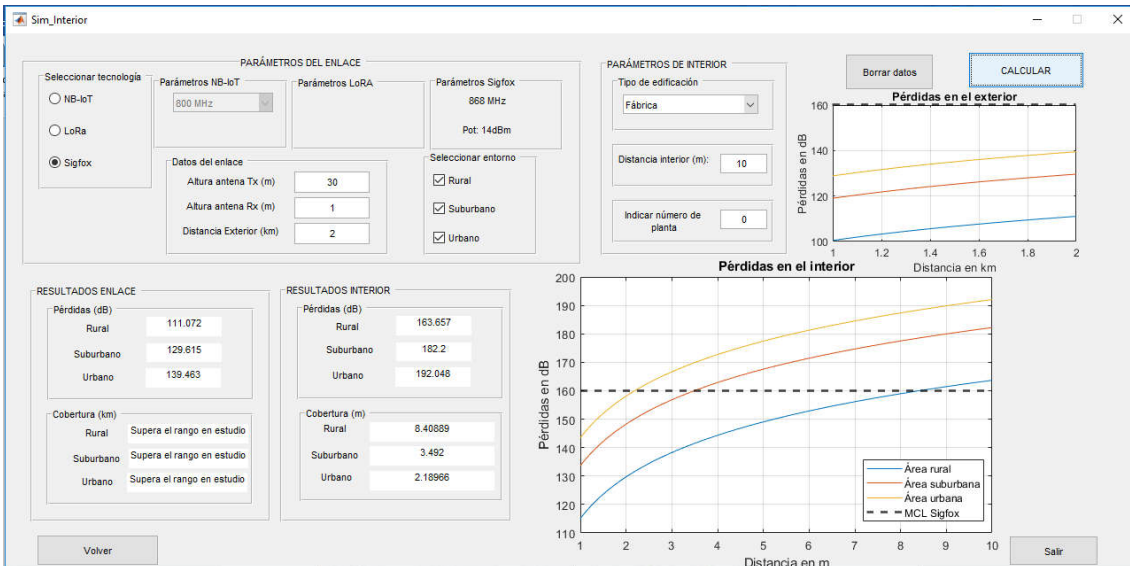


Figura 50. Comportamiento de Sigfox en el interior de una fábrica

La figura 50 simula el comportamiento de Sigfox en el interior de una fábrica. Al igual que con LoRa, la cobertura no llega a los 10 metros interiores, el mejor de los casos sería que la fábrica se encuentre en un entorno rural, donde la distancia máxima cubierta es de 8.4m. Si se encuentra en área suburbana o urbana, la distancia interior máxima es de 3.4 y 2.1 metros respectivamente.

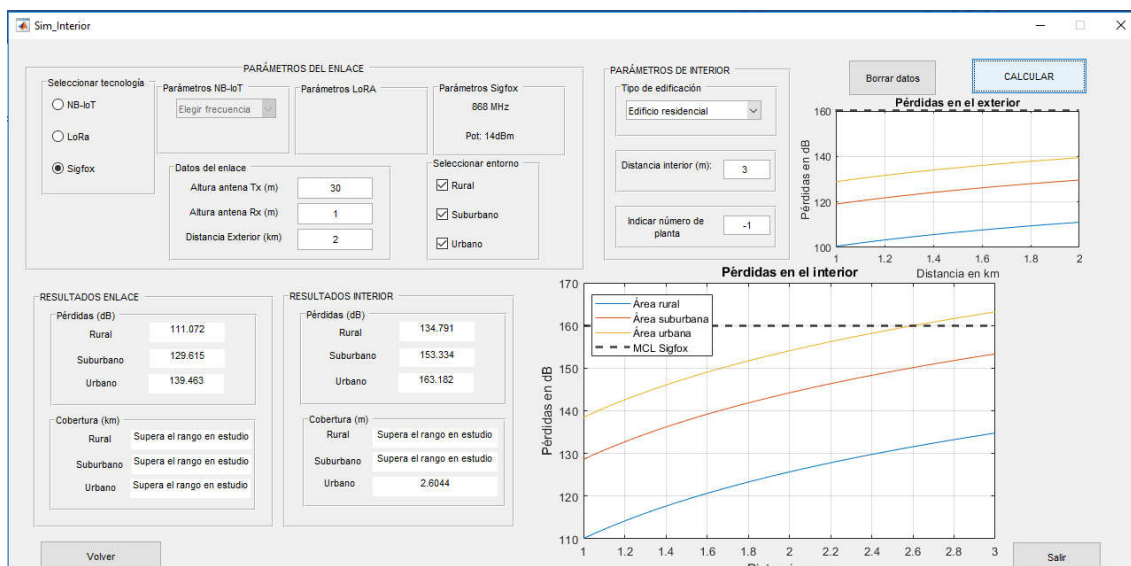


Figura 51. Comportamiento de Sigfox en el sótano de una edificación residencial

Por último, en la figura 51 se puede observar el comportamiento Sigfox si los dispositivos se encuentran en el sótano de un edificio residencial, donde la cobertura solo sería suficiente en el caso de que el edificio se encuentre en un área rural o suburbana y el receptor podría ubicarse a más de 3m en el interior del sótano. En el caso de estar en un área urbana, la distancia máxima en el interior del sótano para estar dentro del rango de cobertura, es de 2.6 metros.

### 5.4.3 Conclusiones

En la siguiente tabla se resumen los resultados de las coberturas simuladas:

Ubicación	Entorno	NB-IoT	LoRa	Sigfox
Exterior	Urbano	11.4km	6.8km	8.3km
	Suburbano	>15km	13km	>15km
	Rural	>15km	>15km	>15km
Interior de una fábrica	Urbano	3.3m	1.8m	2.1m
	Suburbano	5.2m	3m	3.4m
	Rural	>10m	7.2m	8.4m
Interior de sótano residencial	Urbano	>3m	2.2m	2.6m
	Suburbano	>3m	>3m	>3m
	Rural	>3m	>3m	>3m

Tabla 21. Resumen de los resultados de cobertura simulados

En las diferentes simulaciones los resultados son los esperados, en el estudio de simulación en el exterior, las tecnologías tienen un comportamiento bastante similar, destacando el alcance de NB-IoT y Sigfox frente a Lora. Mientras que cuando el receptor se encuentra en el interior de una edificación, NB-IoT proporciona una significativa mejora de probabilidad de cobertura, incluso cuando se experimentan condiciones de elevadas pérdidas en el enlace.

## 6. Conclusiones

En esta memoria se ha realizado el estudio en profundidad de NB-IoT y un análisis de las principales características técnicas de Sigfox y LoRa, así como un resumen de las ventajas en términos de factores IoT de estas 3 tecnologías. Además, se ha desarrollado un simulador de capacidad de cobertura de dichas tecnologías en diferentes entornos, de modo que, combinando este simulador con la comparativa entre sistemas estudiada en el capítulo 3 y con las reflexiones acerca de sus ventajas y desventajas, presentada en el capítulo 4, el lector podrá tener las herramientas necesarias para seleccionar el sistema más apropiado para una aplicación IoT concreta.

Cada tecnología tiene su lugar en el mercado de la IoT. Sigfox y LoRa sería más propicias en cuanto a dispositivos de menor coste, con alta cobertura, tasa de comunicaciones poco frecuentes y baterías de duración muy larga. A diferencia de Sigfox, LoRa también cumple en el despliegue de red local y la comunicación fiable cuando los dispositivos se mueven a alta velocidad.

Al contrario, NB-IoT cumple con el mercado IoT de más alto valor que está dispuesto a pagar por una latencia extremadamente baja y una muy alta calidad de servicio.

En cuanto al coste del despliegue, la red Sigfox ya está desplegada, por lo que solo es necesario comprar los dispositivos y pagar por su uso; mientras que en LoRa es proveedor del servicio final quien tiene que desplegar los puntos de acceso, suponiendo una mayor inversión. En NB-IoT, la red la despliega el proveedor, pero no se utiliza el sistema LTE ya desplegado, por lo que las operadoras deberían incluir esta funcionalidad.

A pesar de las comprobaciones de las compañías de telefonía móvil, la ausencia actual de despliegue comercial de NB-IoT deja abiertas cuestiones sobre la duración real de las baterías y el rendimiento alcanzable por esta tecnología en las condiciones del mundo real.

Se espera que la comunicación móvil inalámbrica de quinta generación (5G) proporcione los medios para un mundo totalmente conectado de personas y dispositivos para el año 2020, que lleve a una solución LPWAN global para las aplicaciones IoT.



## 7. Glosario

**CFO:** Carrier Frequency Offset  
**CloT:** Consumer Internet of Things  
**CSB:** Code Sub Block  
**CSGN:** CloT Serving Gateway Node  
**DRX:** Discontinuous reception  
**eNB:** evolved Node B  
**EPC:** Evolved Packet Core  
**EPS:** Evolved Packet System  
**MIB:** Master Information Block  
**MMB:** Millimeter-wave Mobile Broadband  
**MME:** Mobility Management Entity  
**MTC:** Machine Type Communication  
**NAS:** Non Access Stratum  
**NB-IoT:** Narrow Band Internet of Things  
**NRS:** Narrowband Reference Signal  
**OFDMA:** Orthogonal Frequency-Division Multiple Access  
**PCI:** Physical Cell ID  
**PGW:** Packet Data Network Gateway  
**PRB:** Physical Resource Block  
**RAR:** Random Access Response  
**RB:** Resource Block  
**RE:** Resource Element  
**RNTI:** Radio Network Temporary Identifier  
**RRC:** Radio Resource Control  
**SCEF:** Service Capability Exposer Function  
**SC-FDMA:** Single-Carrier Frequency Division Multiple Access  
**SIB:** System Information Block  
**SFN:** System Frame Number  
**SGW:** Serving Gateway  
**TBCC:** Tail Biting Convolutional Codes  
**TBS:** Transport Block Size  
**TTI:** Transmission Time Interval  
**UE:** User Equipment

## 8. Bibliografía

- [1] 3GPP TR 45.820 Cellular System support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT)
- [2] J. Gozalvez, "New Standard for IoT [Mobile Radio\*], in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 14-20, March 2016.
- [3] S. Landström, J. Bergström, E. Westerberg, D. Hammarwall, "NB-IoT: A sustainable technology for connecting billions of devices", in Ericsson Technology Review, vol. 93, no. 3, pp. 2-11, April 2016.
- [4] 3GPP TR 23.770, Study on System Impacts of Extended DRX Cycle for Power Consumption Optimization.
- [5] 3GPP TS 36.300 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2
- [6] 3GPP TR 23.720 Study on architecture enhancements for Cellular Internet of Things.
- [7] 3GPP TR 23.708 Architecture Enhancements for Service Capability Exposure (AESE).
- [8] 3GPP, December 2015, NB-IoT work item description RP-152284, disponible en: <http://ow.ly/4mQAfx>
- [9] 3GPP, TR 36.888, Study on provision of low-cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipments (UEs) based on LTE (v12.0.0), disponible en: <http://ow.ly/4mQAwn>
- [10] "Cellular Networks for Massive IoT," Ericsson White Paper, Jan. 2016; disponible en: [www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp\\_iot.pdf](http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iot.pdf)
- [11] H. Shariatmadari et al., "Machine-Type Communications: Current Status and Future Perspectives toward 5G Systems," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, Sept. 2015, pp. 10–17.
- [12] Ericsson and Nokia Networks, "Further LTE Physical Layer Enhancements for MTC," RP-141660, 3GPP TSG RAN Meeting #65, Sept. 2014; disponible en: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/tsg\\_ran/TSGR\\_65/Docs/RP-141660.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/tsg_ran/TSGR_65/Docs/RP-141660.zip)
- [13] Qualcomm, Inc., "Narrowband IoT (NB-IoT)," RP-151621, 3GPP TSG RAN Meeting #69, Sept. 2015; disponible en: [www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/TSG\\_RAN/TSGR\\_69/Docs/RP-151621.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_69/Docs/RP-151621.zip)
- [14] 3GPP TS36.211, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Physical Channels and Modulation," v. 13.3.0, Sept. 2016, disponible en: [www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.211/36211-d30.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211/36211-d30.zip)
- [15] 3GPP TS36.212, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Multiplexing and channel coding," v. 13.3.0, Sept. 2016; disponible en: [www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.212/36212-d30.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.212/36212-d30.zip)
- [16] X. Lin, A. Adhikary, and Y.-P. E. Wang, "Random Access Preamble Design and Detection for 3GPP Narrowband IoT systems," to appear, IEEE Wireless Commun. Letters.
- [17] J. Chen et al., "Narrowband Internet of Things: Implementations and applications," IEEE Internet Things J., vol. 4, no. 6, pp. 2309–2314, Dec. 2017.
- [18] J. Schlienz and D. Raddino, "Narrowband Internet of Things," Munich, Germany, Rohde & Schwarz, White Paper, 2016.

- [19] Y.-P. E. Wang et al., "A primer on 3GPP narrowband Internet of Things," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 117–123, Mar. 2017.
- [20] R. Sinha, Y. Wei, and S. Hwang, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *ICT Express (Elsevier)*, DoI: 10.1016/j.icte.2017.03.004, to appear.
- [21] R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Doha, Qatar, 2016, pp. 428–432.
- [22] M. Chen, J. Wan, S. Gonzalez, X. Liao, and V. C. M. Leung, "A survey of recent developments in home M2M networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 1, pp. 98–114, 1st Quart., 2014.
- [23] N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, and A. Ghosh, "NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT," in *Proc. IEEE 27th IEEE Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Valencia, Spain, 2016, pp. 1–6.
- [24] A. Adhikary, X. Lin, and Y.-P. E. Wang, "Performance evaluation of NB-IoT coverage," in *Proc. IEEE 84th IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1–5.
- [25] M. Lauridsen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, M. Sorensen, and S. Holst, "Coverage and capacity analysis of LTE-M and NB-IoT in a rural area," in *Proc. IEEE 84th IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1–5.
- [26] X. Lin, A. Adhikary, and Y.-P. E. Wang, "Random access preamble design and detection for 3GPP narrowband IoT systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 640–643, Dec. 2016.
- [27] A. Ali and W. Hamouda, "On the cell search and initial synchronization for NB-IoT LTE systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 8, pp. 1843–1846, Aug. 2017.
- [28] H. Kroll, M. Korb, B. Weber, S. Willi, and Q. Huang, "Maximumlikelihood detection for energy-efficient timing acquisition in NB-IoT," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1–5.
- [29] G. Fortino, R. Gravina, W. Russo, and C. Savaglio, "Modeling and simulation of Internet of Things systems: A hybrid agent-oriented approach," *IEEE Comput. Sci. Eng.*, to be published, doi: 10.1109/MCSE.2017.59.
- [30] G. Fortino, "Agents meet the IoT: Toward ecosystems of networked smart objects," *IEEE Syst. Man Cybern. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 43–47, Apr. 2016, doi: 10.1109/MSMC.2016.2557483.
- [31] C. H. Liu, J. Fan, J. W. Branch, and K. K. Leung, "Toward QoI and energy-efficiency in Internet-of-Things sensory environments," *IEEE Trans. Emerg. Topics Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 473–487, Dec. 2014.
- [32] C. H. Liu, J. Fan, P. Hui, J. Wu, and K. K. Leung, "Toward QoI and energy efficiency in participatory crowdsourcing," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4684–4700, Oct. 2015.
- [33] 3GPP TS36.213, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); "Physical layer procedures," v. 13.2.0, Jun. 2016
- [34] 3GPP TS36.304, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); "User Equipment (UE) procedures in idle mode" v. 13.2.0, Jun. 2016

- [35] 3GPP TS36.321, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); “Medium Access Control (MAC) protocol specification” v. 13.2.0, jun. 2016
- [36] K Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer, “A comparative Study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment” France, Dec. 2017
- [37] Font Waviot: <http://waviot.com/technology/what-is-lpwan> [Accés el 11 de març 2018]
- [38] U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara, Low power wide area networks: An overview, IEEE J. Commun. Surv. Tuto. 19 (2) (2017) 855–873.
- [39] K. Mikhaylov, T. Haenninen, Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology, in: Proc. of EWC, Oulu, Finland, 2016, pp. 119–124.
- [40] Sigfox world coverage available in: [www.sigfox.com/en/coverage/](http://www.sigfox.com/en/coverage/)
- [41] LoRa world coverage available in: [www.lora-alliance.org/](http://www.lora-alliance.org/)
- [42] LoRa Alliance, LoRaWAN What is it. Technical Marketing Workgroup 1.0, Nov., 2015. Available: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [43] <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-radio-technology>
- [44] “Internet of Things for Architects” Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security by Perry Lea. 2018. ISBN-10: 1788470591.
- [45] <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- [46] G. Tsoukaneri, M. Condoluci, “Group Communications in Narrowband-IoT: Architecture, Procedures, and Evaluation”, IEEE Internet of things Journal, Vol. 5, No. 3, June 2018
- [47] Y. Miao, W. Li, D. Tian, “Narrowband Internet of Things: Simulation and Modeling”, IEEE Internet of things Journal, Vol. 5, No. 4, Aug. 2018
- [48] Y. Songa, J. Lina, M. Tangb, S. Dongb, “An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN”, Clean Energy-Review, Elsevier. Engineering 3 (2017) 460–466
- [49] [www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA266](http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA266)
- [50] <http://www.sharetechnote.com/>
- [51] <http://www.techplayon.com/narrow-band-lte-narrow-band-iot-nb-iot/>
- [52] Recomendación UIT-R P.1238-9. “Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz
- [53] <http://www.techplayon.com/maximum-couple-loss/>

## 9. Anexos

### ➤ Código de la programación en Matlab de Menú Principal

```
% --- Executes just before Menu_Principal is made visible.
function Menu_Principal_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
%Posición y tamaño del logo
[x,map]=imread('UOC_logo.jpg','jpg');
image(x),colormap(map),axis off, hold on
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Menu_Principal_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in btn_enlace.
function btn_enlace_Callback(hObject, eventdata, handles)
Simulacion
close (gcbf);
% --- Executes on button press in btn_interiores.
function btn_interiores_Callback(hObject, eventdata, handles)
Sim_Interior
close (gcbf);
% --- Executes on button press in Btn_salir.
function Btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close (gcbf);
```

### ➤ Código de la programación en Matlab de Simulación del enlace

```
function Simulacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
set(handles.frec_NB, 'Enable', 'off')
set(handles.potencia_NB, 'Visible', 'off')
set(handles.frec_lora, 'Visible', 'off')
set(handles.potencia_lora, 'Visible', 'off')
set(handles.frec_sigfox, 'Visible', 'off')
set(handles.potencia_sigfox, 'Visible', 'off')
set(handles.elegir_NB, 'Value', 0)
h=handles.axes1;
set(h, 'XTick', [], 'YTick', [])
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Simulacion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in btn_volver.
function btn_volver_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
close (gcbf);
% --- Executes on button press in btn_borra_datos.
function btn_borra_datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Borra todos los datos introducidos por el usuario
set(handles.edit_Tx, 'String', ' ');
set(handles.edit_Rx, 'String', ' ');
set(handles.edit_distancia, 'String', ' ');
set(handles.perdidas_rural, 'String', ' ');
```

```

set(handles.perdidas_suburbano, 'String', ' ');
set(handles.perdidas_urbano, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_rural, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_suburbano, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_urbano, 'String', ' ');
set(handles.btn_rural, 'value', 0);
set(handles.btn_suburbano, 'value', 0);
set(handles.btn_urbano, 'value', 0);
set(handles.elegir_NB, 'value', 0);
set(handles.elegir_lora, 'value', 0);
set(handles.elegir_sigfox, 'value', 0);
set(handles.frec_NB, 'Enable', 'off');
set(handles.potencia_NB, 'Visible', 'off');
set(handles.frec_lora, 'Visible', 'off');
set(handles.potencia_lora, 'Visible', 'off');
set(handles.frec_sigfox, 'Visible', 'off');
set(handles.potencia_sigfox, 'Visible', 'off');
h=handles.axes1;
plot([0 1],[0 1], 'w-');
set(h, 'XTick', [], 'YTick', [])
% --- Executes on button press in btn_simulacion.
function btn_simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
%%Cálculo de la simulación
% Declaración de variables
ht=str2double(get(handles.edit_Tx, 'String'));
hr=str2double(get(handles.edit_Rx, 'String'));
d=str2double(get(handles.edit_distancia, 'String'));
%Simular NB-IoT
if get(handles.elegir_NB, 'value')==1
    %Potencia máxima de NB-IoT
    potencia=0.2;
    %Valor de MCL para NB-IoT
    MCL=164;
    %Frecuencia seleccionada
    Frequency=get(handles.frec_NB, 'value');
    switch Frequency
        case 1
            return;
        case 2
            f=800;
        case 3
            f=1800;
        case 4
            f=2600;
    end
%Simular LoRa
elseif get(handles.elegir_lora, 'value')==1
    %Potencia máxima de LoRa
    potencia=0.025;
    %Valor de MCL para LoRa
    MCL=157;
    %Frecuencia de LoRa
    f=868;
%Simular Sigfox
elseif get(handles.elegir_sigfox, 'value')==1
    %Potencia máxima de Sigfox
    potencia=0.025;
    %Valor de MCL para Sigfox
    MCL=160;
    %Frecuencia de Sigfox
    f=868;

```

```

end
%%Modelo Okumura-Hata
%perdidas por trayectoria en areas urbanas (media) (dB)
Lp=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(ht)-((1.1*log10(f)-0.7)*hr-
1.56*log10(f)-0.8)+(44.9-6.55*log10(ht))*log10(d);
%perdidas por trayectoria en areas suburbanas (media) (dB)
Lps=Lp-2*(log10(f/28))^2-5.4;
%perdidas por trayectoria en areas abiertas (media) (dB)
Lpo=Lp-4.78*(log10(f))^2+18.33*log10(f)-40.98;
%%Graficar pérdidas vs distancia
d1=1:0.01:d;
n=length(d1);
for i=1:n
    Lurbana(i)=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(ht)-((1.1*log10(f)-
0.7)*hr-1.56*log10(f)-0.8)+(44.9-6.55*log10(ht))*log10(d1(i));
    Lsuburbana(i)=Lurbana(i)-2*(log10(f/28))^2-5.4;
    Lrural(i)=Lurbana(i)-4.78*(log10(f))^2+18.33*log10(f)-40.98;
end
axes(handles.axes1)
R=get(handles.btn_rural,'Value');
S=get(handles.btn_suburbano,'Value');
U=get(handles.btn_urbano,'Value');
switch R
    case 1
        case 1
            if S==1 && U==1
                plot(d1,Lrural,d1,Lsuburbana,d1,Lurbana)
                legend('Área rural','Área suburbana','Área
urbana','Location','best')
            elseif S==1 && U==0
                plot(d1,Lrural,d1,Lsuburbana)
                legend('Área rural','Área suburbana','Location','best')
            elseif S==0 && U==1
                plot(d1,Lrural,d1,Lurbana)
                legend('Área rural','Área urbana','Location','best');
            else
                plot(d1,Lrural)
                legend('Área rural','Location','best')
            end
        case 0
            if S==1 && U==1
                plot(d1,Lsuburbana,d1,Lurbana)
                legend('Área suburbana','Área urbana','Location','best')
            elseif S==1 && U==0
                plot(d1,Lsuburbana)
                legend('Área suburbana','Location','best')
            elseif S==0 && U==1
                plot(d1,Lurbana)
                legend('Área urbana','Location','best')
            else
                plot(d1,Lrural)
                legend('Área rural','Location','best')
            end
        end
    end
end
%%Representar línea de corte de MCL según tecnología
if get(handles.elegir_NB,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL Nb-IoT');
elseif get(handles.elegir_lora,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL LoRa');
elseif get(handles.elegir_sigfox,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL Sigfox');
end

```

```

xlabel('Distancia en km');
ylabel('Pérdidas en dB');
grid
title('Pérdidas según la distancia')
%Escribir resultados de pérdidas y cobertura máxima en km según
entorno
Cobrural=interp1(Lrural,d1,MCL);
Cobsuburb=interp1(Lsuburbana,d1,MCL);
Coburb=interp1(Lurbana,d1,MCL);
if get(handles.btn_rural,'value')==1
    LP=Lpo;
    set(handles.perdidas_rural,'String',LP)
    if Cobrural<=d
        set(handles.cobertura_rural,'String',Cobrural)
    elseif Lrural(i)<MCL
        set(handles.cobertura_rural,'String','Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cobertura_rural,'String','Cobertura insuficiente')
    end
end
else
    set(handles.perdidas_rural,'String',' ')
    set(handles.cobertura_rural,'String',' ')
end
if get(handles.btn_suburbano,'value')==1
    LP=Lps;
    set(handles.perdidas_suburbano,'String',LP)
    if Cobsuburb<=d
        set(handles.cobertura_suburbano,'String',Cobsuburb)
    elseif Lsuburbana(i)<MCL
        set(handles.cobertura_suburbano,'String','Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cobertura_suburbano,'String','Cobertura
insuficiente')
    end
end
else
    set(handles.perdidas_suburbano,'String',' ')
    set(handles.cobertura_suburbano,'String',' ')
end
if get(handles.btn_urbano,'value')==1
    LP=Lp;
    set(handles.perdidas_urbano,'String',LP)
    if Coburb<=d
        set(handles.cobertura_urbano,'String',Coburb)
    elseif Lurbana(i)<MCL
        set(handles.cobertura_urbano,'String','Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cobertura_urbano,'String','Cobertura
insuficiente')
    end
end
else
    set(handles.perdidas_urbano,'String',' ')
    set(handles.cobertura_urbano,'String',' ')
end
% --- Executes on button press in btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf);
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Tx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```



```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Rx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_distancia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frec_NB_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes when selected object is changed in grupo_tecnologia.
function grupo_tecnologia_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata,
handles)
%Datos de Frecuencia y potencia según tecnología seleccionada
Tecnologia=get(hObject,'String');
switch Tecnologia
    case 'NB-IoT'
        set(handles.frec_NB,'Enable','on')
        set(handles.potencia_NB,'Visible','on')
        set(handles.frec_lora,'Visible','off')
        set(handles.potencia_lora,'Visible','off')
        set(handles.frec_sigfox,'Visible','off')
        set(handles.potencia_sigfox,'Visible','off')
    case 'LoRa'
        set(handles.frec_lora,'Visible','on')
        set(handles.potencia_lora,'Visible','on')
        set(handles.frec_NB,'Enable','off')
        set(handles.potencia_NB,'Visible','off')
        set(handles.frec_sigfox,'Visible','off')
        set(handles.potencia_sigfox,'Visible','off')
    case 'Sigfox'
        set(handles.frec_sigfox,'Visible','on')
        set(handles.potencia_sigfox,'Visible','on')
        set(handles.frec_NB,'Enable','off')
        set(handles.potencia_NB,'Visible','off')
        set(handles.frec_lora,'Visible','off')
        set(handles.potencia_lora,'Visible','off')
end

```

### ➤ Código de la programación en Matlab de Simulación en interiores

```

% --- Executes just before Sim_Interior is made visible.
function Sim_Interior_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
set(handles.frec_NB,'Enable','off')
set(handles.potencia_NB,'Visible','off')
set(handles.frec_lora,'Visible','off')
set(handles.potencia_lora,'Visible','off')

```

```

set(handles.frec_sigfox,'Visible','off')
set(handles.potencia_sigfox,'Visible','off')
set(handles.elegir_NB,'Value',0)
set(handles.elegir_lora,'Value',0)
set(handles.elegir_sigfox,'Value',0)
h=handles.axes1;
set(h,'XTick',[],'YTick',[])
h2=handles.axes2;
set(h2,'XTick',[],'YTick',[])
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Sim_Interior_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Tx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Rx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_distancia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frec_NB_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tipo_edificacion_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function p_numero_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function dist_Rx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in btn_simulacion.
function btn_simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Calcular pérdidas en espacio abierto

```

```

% Declaración de variables
ht=str2double(get(handles.edit_Tx,'String'));
hr=str2double(get(handles.edit_Rx,'String'));
d=str2double(get(handles.edit_distancia,'String'));
%Simular NB-IoT
if get(handles.elegir_NB,'value')==1
    %Potencia máxima de NB-IoT
    potencia=0.2;
    %Valor de MCL para NB-IoT
    MCL=164;
    %Frecuencia seleccionada
    Frecuency=get(handles.frec_NB,'value');
    switch Frecuency
        case 1
            return;
        case 2
            f=800;
        case 3
            f=1800;
        case 4
            f=2600;
    end
%Simular LoRa
elseif get(handles.elegir_lora,'value')==1
    %Potencia máxima de LoRa
    potencia=0.025;
    %Valor de MCL para LoRa
    MCL=157;
    %Frecuencia de LoRa
    f=868;
%Simular Sigfox
elseif get(handles.elegir_sigfox,'value')==1
    %Potencia máxima de Sigfox
    potencia=0.025;
    %Valor de MCL para Sigfox
    MCL=160;
    %Frecuencia de Sigfox
    f=868;
end
%%Modelo Okumura-Hata
%perdidas por trayectoria en areas urbanas (media) (dB)
Lp=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(ht)-((1.1*log10(f)-0.7)*hr-
1.56*log10(f)-0.8)+(44.9-6.55*log10(ht))*log10(d);
%perdidas por trayectoria en areas suburbanas (media) (dB)
Lps=Lp-2*(log10(f/28))^2-5.4;
%perdidas por trayectoria en areas abiertas (media) (dB)
Lpo=Lp-4.78*(log10(f))^2+18.33*log10(f)-40.98;
%Graficar pérdidas vs distancia
d1=1:0.01:d;
n=length(d1);
for i=1:n
    Lurbana(i)=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(ht)-((1.1*log10(f)-
0.7)*hr-1.56*log10(f)-0.8)+(44.9-6.55*log10(ht))*log10(d1(i));
    Lsuburbana(i)=Lurbana(i)-2*(log10(f/28))^2-5.4;
    Lrural(i)=Lurbana(i)-4.78*(log10(f))^2+18.33*log10(f)-40.98;
end
axes(handles.axes1)
R=get(handles.btn_rural,'Value');
S=get(handles.btn_suburbano,'Value');
U=get(handles.btn_urbano,'Value');
switch R

```

```

case 1
    if S==1 && U==1
        plot(d1,Lrural,d1,Lsuburbana,d1,Lurbana)
    elseif S==1 && U==0
        plot(d1,Lrural,d1,Lsuburbana)
    elseif S==0 && U==1
        plot(d1,Lrural,d1,Lurbana)
    else
        plot(d1,Lrural)
    end
case 0
    if S==1 && U==1
        plot(d1,Lsuburbana,d1,Lurbana)
    elseif S==1 && U==0
        plot(d1,Lsuburbana)
    elseif S==0 && U==1
        plot(d1,Lurbana)
    else
        plot(d1,Lrural)
    end
end
%Representar línea de corte de MCL según tecnología
if get(handles.elegir_NB,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2);
elseif get(handles.elegir_lora,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2);
elseif get(handles.elegir_sigfox,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2);
end
xlabel('Distancia en km');
ylabel('Pérdidas en dB');
grid
title('Pérdidas en el exterior')
%Escribir resultados de pérdidas y cobertura según area seleccionada
%y cobertura máxima en km en espacio abierto
Cobrural=interp1(Lrural,d1,MCL);
Cobsuburb=interp1(Lsuburbana,d1,MCL);
Coburb=interp1(Lurbana,d1,MCL);
if get(handles.btn_rural,'value')==1
    LP=Lpo;
    set(handles.perdidas_rural,'String',LP)
    if Cobrural<=d
        set(handles.cobertura_rural,'String',Cobrural)
    else
        set(handles.cobertura_rural,'String','Supera el rango en
estudio')
    end
end
else
    set(handles.perdidas_rural,'String',' ')
    set(handles.cobertura_rural,'String',' ')
end
if get(handles.btn_suburbano,'value')==1
    LP=Lps;
    set(handles.perdidas_suburbano,'String',LP)
    if Cobsuburb<=d
        set(handles.cobertura_suburbano,'String',Cobsuburb)
    else
        set(handles.cobertura_suburbano,'String','Supera el rango en
estudio')
    end
end
else

```

```

        set(handles.perdidas_suburbano,'String',' ')
        set(handles.cobertura_suburbano,'String',' ')
    end
    if get(handles.btn_urbano,'value')==1
        LP=Lp;
        set(handles.perdidas_urbano,'String',LP)
        if Coburb<=d
            set(handles.cobertura_urbano,'String',Coburb)
        else
            set(handles.cobertura_urbano,'String','Supera el rango en
estudio')
        end
    else
        set(handles.perdidas_urbano,'String',' ')
        set(handles.cobertura_urbano,'String',' ')
    end
    %Cálculo de pérdidas según Rec UIT-R P.1238-9
    %Coeficientes de pérdida por penetración en el suelo para
    %transmisión en interiores según tipo de edificación
    n_planta=str2double(get(handles.p_numero,'String'));
    edificio=get(handles.tipo_edificacion,'Value');
    switch edificio
        case 1
            return
            %Edificio residencial
        case 2
            if get(handles.elegir_NB,'Value')==1
                Frecuency=get(handles.frec_NB,'value');
                switch Frecuency
                    %%Frecuencia 800MHz
                    case 2
                        perdida_potencia=22.5;
                        perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
                    %%Frecuencia 1800MHz
                    case 3
                        perdida_potencia=28;
                        perdida_suelo=4*(n_planta);
                    %%Frecuencia 2600MHz
                    case 4
                        perdida_potencia=28;
                        perdida_suelo=10;
                end
                %%Frecuencia 868MHz en los casos de LoRa y Sigfox
            elseif get(handles.elegir_lora,'Value')==1
                perdida_potencia=22.5;
                perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
            elseif get(handles.elegir_sigfox,'Value')==1
                perdida_potencia=22.5;
                perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
            end
            %Edificio de oficinas
        case 3
            if get(handles.elegir_NB,'Value')==1
                Frecuency=get(handles.frec_NB,'value');
                switch Frecuency
                    %%Frecuencia 800MHz
                    case 2
                        perdida_potencia=22.5;
                        perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
                    %%Frecuencia 1800MHz
                    case 3

```

```

        perdida_potencia=30;
        perdida_suelo=15+4*(n_planta);
    %%Frecuencia 2600MHz
    case 4
        perdida_potencia=44;
        perdida_suelo=14;
    end
    %%Frecuencia 868MHz en los casos de LoRa y Sigfox
    elseif get(handles.elegir_lora, 'Value')==1
        perdida_potencia=33;
        perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
    elseif get(handles.elegir_sigfox, 'Value')==1
        perdida_potencia=33;
        perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
    end
    %Edificio comercial
    case 4
        if get(handles.elegir_NB, 'Value')==1
            Frecuency=get(handles.frec_NB, 'value');
            switch Frecuency
                %%Frecuencia 800MHz
                case 2
                    perdida_potencia=20;
                    perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
                %%Frecuencia 1800MHz
                case 3
                    perdida_potencia=22;
                    perdida_suelo=6+3*(n_planta);
                %%Frecuencia 2600MHz
                case 4
                    perdida_potencia=22;
                    perdida_suelo=14;
            end
            %%Frecuencia 868MHz en los casos de LoRa y Sigfox
            elseif get(handles.elegir_lora, 'Value')==1
                perdida_potencia=20;
                perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
            elseif get(handles.elegir_sigfox, 'Value')==1
                perdida_potencia=20;
                perdida_suelo=9+5*(n_planta-1);
            end
        %Fábrica
        case 5
            if get(handles.elegir_NB, 'Value')==1
                Frecuency=get(handles.frec_NB, 'value');
                switch Frecuency
                    %%Frecuencia 800MHz
                    case 2
                        perdida_potencia=21.1;
                        perdida_suelo=0;
                    %%Frecuencia 1800MHz
                    case 3
                        perdida_potencia=21.1;
                        perdida_suelo=0;
                    %%Frecuencia 2600MHz
                    case 4
                        perdida_potencia=33;
                        perdida_suelo=0;
                end
                %%Frecuencia 868MHz en los casos de LoRa y Sigfox
                elseif get(handles.elegir_lora, 'Value')==1

```

```

        perdida_potencia=21.1;
        perdida_suelo=0;
    elseif get(handles.elegir_sigfox, 'Value')==1
        perdida_potencia=21.1;
        perdida_suelo=0;
    end
end
%Declaración de variables
d2=str2double(get(handles.dist_Rx, 'String'));
N=perdida_potencia;
if get(handles.p_numero, 'String')=='0'
    Lfn=0;
else
    Lfn=perdida_suelo;
end
%Pérdidas en entorno rural
Ld0r=str2double(get(handles.perdidas_rural, 'String'));
Ltotalr=Ld0r+N*log(d2)+Lfn;
if get(handles.btn_rural, 'value')==1
    set(handles.perd_rural_int, 'String', Ltotalr)
else
    set(handles.perd_rural_int, 'String', ' ')
end
%Pérdidas en entorno suburbano
Ld0s=str2double(get(handles.perdidas_suburbano, 'String'));
Ltotals=Ld0s+N*log(d2)+Lfn;
if get(handles.btn_suburbano, 'value')==1
    set(handles.perd_suburbano_int, 'String', Ltotals)
else
    set(handles.perd_suburbano_int, 'String', ' ')
end
%Pérdidas en entorno urbano
Ld0u=str2double(get(handles.perdidas_urbano, 'String'));
Ltotalu=Ld0u+N*log(d2)+Lfn;
if get(handles.btn_urbano, 'value')==1
    set(handles.perd_urbano_int, 'String', Ltotalu)
else
    set(handles.perd_urbano_int, 'String', ' ')
end
%Graficar pérdidas vs distancia y escribir cobertura en interior
d3=1:0.01:d2;
m=length(d3);
for i=1:m
    Ltotalu(i)=Ld0u+N*log(d3(i))+Lfn;
    Ltotals(i)=Ld0s+N*log(d3(i))+Lfn;
    Ltotalr(i)=Ld0r+N*log(d3(i))+Lfn;
end
Cobrurali=interp1(Ltotalr, d3, MCL);
Cobsuburbi=interp1(Ltotals, d3, MCL);
Coburbi=interp1(Ltotalu, d3, MCL);
if get(handles.btn_rural, 'value')==1
    if Cobrurali<=d2
        set(handles.cob_rural_int, 'String', Cobrurali)
    elseif Ltotalr(i)<MCL
        set(handles.cob_rural_int, 'String', 'Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cob_rural_int, 'String', 'Cobertura insuficiente')
    end
end
else
    set(handles.cob_rural_int, 'String', ' ')
end

```

```

end
if get(handles.btn_suburbano,'value')==1
    if Cobsurbi<=d2
        set(handles.cob_suburbano_int,'String',Cobsurbi)
    elseif Ltotals(i)<MCL
        set(handles.cob_suburbano_int,'String','Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cob_suburbano_int,'String','Cobertura
insuficiente')
    end
else
    set(handles.cob_suburbano_int,'String',' ')
end
if get(handles.btn_urbano,'value')==1
    if Coburbi<=d2
        set(handles.cob_urbano_int,'String',Coburbi)
    elseif Ltotalu(i)<MCL
        set(handles.cob_urbano_int,'String','Supera el rango en
estudio')
    else
        set(handles.cob_urbano_int,'String','Cobertura insuficiente')
    end
else
    set(handles.cob_urbano_int,'String',' ')
end
axes(handles.axes2)
R=get(handles.btn_rural,'Value');
S=get(handles.btn_suburbano,'Value');
U=get(handles.btn_urbano,'Value');
switch R
    case 1
        if S==1 && U==1
            plot(d3,Ltotalr,d3,Ltotals,d3,Ltotalu)
            legend('Área rural','Área suburbana','Área
urbana','Location','best')
        elseif S==1 && U==0
            plot(d3,Ltotalr,d3,Ltotals)
            legend('Área rural','Área suburbana','Location','best')
        elseif S==0 && U==1
            plot(d3,Ltotalr,d3,Ltotalu)
            legend('Área rural','Área urbana','Location','best');
        else
            plot(d3,Ltotalr)
            legend('Área rural','Location','best')
        end
    case 0
        if S==1 && U==1
            plot(d3,Ltotals,d3,Ltotalu)
            legend('Área suburbana','Área urbana','Location','best')
        elseif S==1 && U==0
            plot(d3,Ltotals)
            legend('Área suburbana','Location','best')
        elseif S==0 && U==1
            plot(d3,Ltotalu)
            legend('Área urbana','Location','best')
        else
            plot(d3,Ltotalr)
            legend('Área rural','Location','best')
        end
end
end

```



```

%Representar línea de corte de MCL según tecnología
if get(handles.elegir_NB,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL Nb-IoT');
elseif get(handles.elegir_lora,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL LoRa');
elseif get(handles.elegir_sigfox,'Value')==1
    yline(MCL,'k--','LineWidth',2,'DisplayName','MCL Sigfox');
end
xlabel('Distancia en m');
ylabel('Pérdidas en dB');
grid
title('Pérdidas en el interior')
% --- Executes on button press in btn_borra_datos.
function btn_borra_datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.edit_Tx, 'String', ' ');
set(handles.edit_Rx, 'String', ' ');
set(handles.edit_distancia, 'String', ' ');
set(handles.perdidas_rural, 'String', ' ');
set(handles.perdidas_suburbano, 'String', ' ');
set(handles.perdidas_urbano, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_rural, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_suburbano, 'String', ' ');
set(handles.cobertura_urbano, 'String', ' ');
set(handles.btn_rural,'value',0);
set(handles.btn_suburbano,'value',0);
set(handles.btn_urbano,'value',0);
set(handles.elegir_NB,'value',0);
set(handles.elegir_lora,'value',0);
set(handles.elegir_sigfox,'value',0);
set(handles.frec_NB,'Enable','off');
set(handles.potencia_NB,'Visible','off')
set(handles.frec_lora,'Visible','off');
set(handles.potencia_lora,'Visible','off')
set(handles.frec_sigfox,'Visible','off');
set(handles.potencia_sigfox,'Visible','off');
set(handles.tipo_edificacion,'Value',1);
set(handles.dist_Rx, 'String', ' ');
set(handles.p_numero, 'String', ' ');
set(handles.perd_rural_int, 'String', ' ');
set(handles.perd_suburbano_int, 'String', ' ');
set(handles.perd_urbano_int,'String', ' ');
set(handles.cob_rural_int,'String', ' ');
set(handles.cob_suburbano_int,'String', ' ');
set(handles.cob_urbano_int,'String', ' ');
axes(handles.axes1)
h=handles.axes1;
plot([0 1],[0 1],'w-');
set(h,'XTick',[],'YTick',[])
axes(handles.axes2)
h2=handles.axes2;
plot([0 1],[0 1],'w-');
set(h2,'XTick',[],'YTick',[])
% --- Executes on button press in btn_volver.
function btn_volver_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
close (gcbf);
% --- Executes on button press in btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close (gcbf);
% --- Executes when selected object is changed in grupo_tecnologia.

```

```

function grupo_tecnologia_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata,
handles)
%Datos de Frecuencia y potencia según tecnología seleccionada
Tecnologia=get(hObject, 'String');
switch Tecnologia
    case 'NB-IoT'
        set(handles.frec_NB, 'Enable', 'on')
        set(handles.potencia_NB, 'Visible', 'on')
        set(handles.frec_lora, 'Visible', 'off')
        set(handles.potencia_lora, 'Visible', 'off')
        set(handles.frec_sigfox, 'Visible', 'off')
        set(handles.potencia_sigfox, 'Visible', 'off')
    case 'LoRa'
        set(handles.frec_lora, 'Visible', 'on')
        set(handles.potencia_lora, 'Visible', 'on')
        set(handles.frec_NB, 'Enable', 'off')
        set(handles.potencia_NB, 'Visible', 'off')
        set(handles.frec_sigfox, 'Visible', 'off')
        set(handles.potencia_sigfox, 'Visible', 'off')
    case 'Sigfox'
        set(handles.frec_sigfox, 'Visible', 'on')
        set(handles.potencia_sigfox, 'Visible', 'on')
        set(handles.frec_NB, 'Enable', 'off')
        set(handles.potencia_NB, 'Visible', 'off')
        set(handles.frec_lora, 'Visible', 'off')
        set(handles.potencia_lora, 'Visible', 'off')
end

```