1 Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Internet de las Cosas, en adelante IoT, está resultando ser un fenómeno donde millones de dispositivos están desplegándose para propósitos de lo más diversos y dando lugar a una red de sensores, actuadores, software y servicios de lo más variopinto.

IoT consiste en dispositivos genéricos multipropósito que se conectan a Internet de distintas maneras. La información puede transitar en esas redes a través de dispositivos que agrupan el tráfico de distintas fuentes, con canales uni- o bidireccionales, con redes punto-multipunto o redes punto a punto entre los distintos elementos, etc.

Las comunicaciones entre máquinas (machine-to-machine M2M), sin la ayuda de un agente humano, ni en la comunicación ni en la interpretación de los datos generados, son las comunicaciones a las que dar servicio y dentro de ellas pasan a considerarse entre dispositivos móviles. Ese es el nuevo modelo.

Se espera tener en 2020 mas de 50 mil millones de dispositivos [**1**] integrados mutiles sectores como el sanitario, la agricultura, los vehículos, las redes electricas o de distribución de agua, edificios, hogares, medioambiente, transporte, etc. Los desafíos que se presentan son varios:

- la gestión de esa ingente cantidad de dispositivos e información de una manera eficiente en cuanto a costes, flexible, interoperable entre los distintos hardware, conectividad, mecanismos de seguridad, etc.
- la optimización de las baterias de los dispositivos para alargar su vida util
- la tipificación de aplicaciones, que de momento se dividen en
    - críticas (cuyos datos deben ser tratados de forma fiable y con baja latencia) y
    - masivas M-IoT (cuyo objetivo esta en tener multitud de dispositivos lo mas sencillos posible, del menor consumo posible, capaces de funcionar en zonas amplias de cobertura de manera flexible en cuanto a requerimientos de latencia y *throughput*).

Van a ser las aplicaciones M-IoT las que parece que se van a llevar el 60% del mercado. Este tipo de aplicaciones van a generar un tráfico muy distinto a dispositivos orientados a comunicaciones entre humanos (H2H), y además van a distar mucho de las comunicaciones M2M en lo que a rango de distancias que se pueden cubrir con bajo consumo de energía. Por todo esto surgen las redes LPWAN: tecnologías para un mercado emergente de dispositivos de baja potencia para pocos datos (tasa de datos transmitida) y zonas de cobertura de kilómetros. Esto tendrá unos costes en la frecuencia (que será mas baja por ser mas “agradecida” en su operación en interiores), en latencia (que será mayor

para reducir el tiempo de funcionamiento y aumentar el tiempo de vida de las baterías), etc.

En este contexto, la masiva incorporación y gestión de dispositivos y un equilibrio con la calidad de servicio QoS son objeto de estudio para su mejora.

Se está trabajando en redes de datos celulares y en redes de tecnologías LPWA propietarias (LoRa, SigFox, RPMA, etc.). En concreto el 3GPP ha introducido en la Rel.13 los conceptos eMTC, NB-IoT y EC-GSM para que, operando sobre espectro licenciado, se pueda rehusar la infraestructura LTE y dar servicio a esas aplicaciones M-IoT. Si particularizamos en NB-IoT, el objetivo es dar conectividad a una cantidad importante de dispositivos de baja potencia sobre aéreas grandes o lugares con baja capacidad de penetración. Se reduce en un 90 % la complejidad el HW, se utiliza infraestructura existente y permite evolucionar a tecnologías mas *verdes*.

Los modelos de tráfico generados por este ecosistema de equipos, servicios, aplicaciones, etc. serán objeto de estudio en el presente Trabajo y se procederá a una comparativa entre las distintas tecnologías para ver su uso óptimo. Son especialmente interesante por tratarse de un tráfico de características especiales (latencia permitida alta, thoughput y cadencia de envio de mensajes bajos, originados por elementos de poco coste, etc.).

El universo de trafico de voz sobre determinadas redes, que pasó a ser de datos por ráfagas por un numero n de equipos con alta demanda de ancho de banda, latencia o QoS, evoluciona hacia nueva versión de generación de datos un numero $m >>> n$ de equipos con otras características que las redes deben ser capaces de “digerir” o cambiar para dar el servicio.

Dentro de las redes existentes en el ámbito LPWAN hay que establecer unas condiciones de contorno (escenarios) que permitan ver las diferencias entre tecnologías con estos modelos de tráfico.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los principales objetivos son:

- Realizar un estado del arte y caracterización de redes Low Power Wide Area Network
- Efectuar un estudio y análisis detallado de NB-IoT
- Hacer una comparativa con otras tecnologías LPWAN.
- Definir los modelos de trafico, las fuentes del mismo y su particularización para IoT con redes LPWAN. Trafico agregado.
- Análisis de resultados y Conclusiones.

1.3 Enfoque y método seguido

En este Trabajo Fin de Master se evoluciona de mas a menos amplitud de conceptos basándose en estudios existentes. El enfoque para las redes y tecnologías es ir pasando por IoT, LPWAN, NB-IoT, y en menor grado en otras tecnologías LPWAN. El enfoque para análisis de tráfico es estudio de modelos de tráfico, fuentes del mismo, trafico agregado y estudios realizados..

Dentro de este enfoque se hará una presentación de la tecnología principal NB-IoT con alto grado de detalle y después describirá de una forma mas somera, pero ya conociendo los parámetros de trabajo, las tecnologías que compiten con la primera en LPWAN: SigFox y LoRa.

Se hará una evaluación de SW existente para simulación de redes de cara a una propuesta de trabajo futuro.

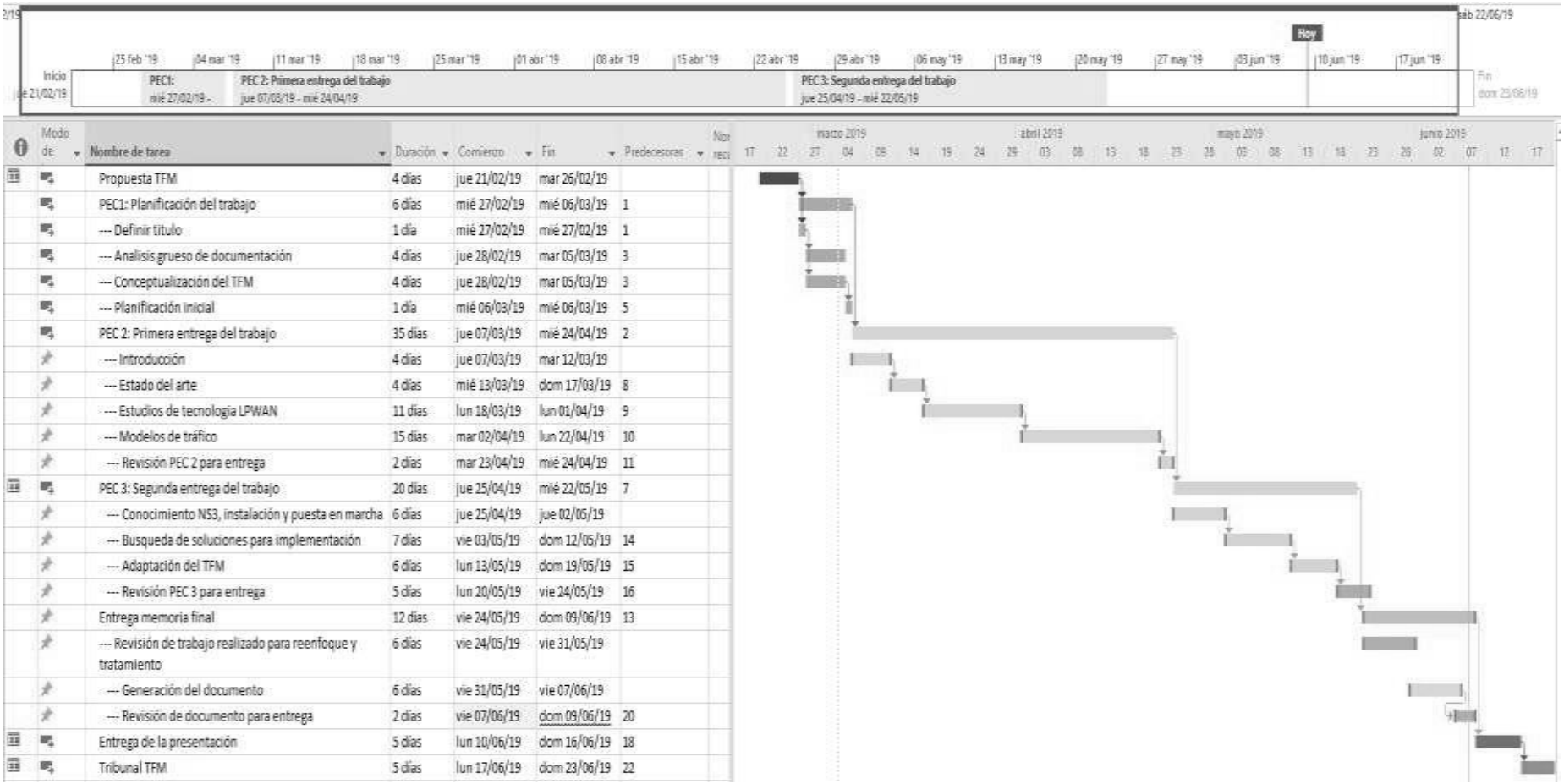
Para este enfoque se ha realizado una planificación, ejecución y control conforme al modelo de referencia PMBOK, dividiendo por bloques y etapas con sus elementos de entrada y salida.

1.4 Planificación del Trabajo

La planificación se ha hecho conforme a los parámetros establecidos por el tutor, y desglosando cada bloque en sub-bloques que permiten hacer un seguimiento y control mayor de la evolución y las desviaciones. Esto ha generado un diagrama de Gantt que integra el plan docente y los distintos puntos del TFM

La planificación ha sufrido cambios debido sobre todo a la inexistencia de implementación de NB-IoT en NS3, lo que ha llevado a un replanteamiento de la organización en el tiempo e incluso, posiblemente, en el alcance del TFM, centrándose mas en un estudio de la tecnología y los modelos de tráfico sobre ella en función de trabajos existentes.

Se ha tenido que modificar la fecha de entrega de PEC3 y siguientes y generar un nuevo enfoque con hitos (fechas y objetivos) adaptados a lo existente para el calendario de la UOC dentro del semestre.



Modo de	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
	Propuesta TFM	4 días	jue 21/02/19	mar 26/02/19	
	PEC1: Planificación del trabajo	6 días	mié 27/02/19	mié 06/03/19	1
	--- Definir título	1 día	mié 27/02/19	mié 27/02/19	1
	--- Analisis grueso de documentación	4 días	jue 28/02/19	mar 05/03/19	3
	--- Conceptualización del TFM	4 días	jue 28/02/19	mar 05/03/19	3
	--- Planificación inicial	1 día	mié 06/03/19	mié 06/03/19	5
	PEC 2: Primera entrega del trabajo	35 días	jue 07/03/19	mié 24/04/19	2
	--- Introducción	4 días	jue 07/03/19	mar 12/03/19	
	--- Estado del arte	4 días	mié 13/03/19	dom 17/03/19	8
	--- Estudios de tecnologia LPWAN	11 días	lun 18/03/19	lun 01/04/19	9
	--- Modelos de tráfico	15 días	mar 02/04/19	lun 22/04/19	10
	--- Revisión PEC 2 para entrega	2 días	mar 23/04/19	mié 24/04/19	11
	PEC 3: Segunda entrega del trabajo	20 días	jue 25/04/19	mié 22/05/19	7
	--- Conocimiento NS3, instalación y puesta en marcha	6 días	jue 25/04/19	jue 02/05/19	
	--- Busqueda de soluciones para implementación	7 días	vie 03/05/19	dom 12/05/19	14
	--- Adaptación del TFM	6 días	lun 13/05/19	dom 19/05/19	15
	--- Revisión PEC 3 para entrega	5 días	lun 20/05/19	vie 24/05/19	16
	Entrega memoria final	12 días	vie 24/05/19	dom 09/06/19	13
	--- Revisión de trabajo realizado para reenfoque y tratamiento	6 días	vie 24/05/19	vie 31/05/19	
	--- Generación del documento	6 días	vie 31/05/19	vie 07/06/19	
	--- Revisión de documento para entrega	2 días	vie 07/06/19	dom 09/06/19	20
	Entrega de la presentación	5 días	lun 10/06/19	dom 16/06/19	18
	Tribunal TFM	5 días	lun 17/06/19	dom 23/06/19	22

Figura 1 Planificación final del TFM

1.5 Breve sumario de productos obtenidos

- Descripción y análisis de la tecnología NB-IoT
- Descripción y análisis de la tecnología Sigfox
- Descripción y análisis de la tecnología LoRa
- Descripción de modelos de tráfico en IoT
- Caracterización de modelos de tráfico en las tecnologías analizadas
- Implementación de modelos de trafico en simulador
- Obtención y análisis de resultados comparativos entre tecnologías
- Conclusiones

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

La presente memoria tiene 4 capítulos y un anexo (además de índice, glosario, y bibliografía), los cuales de forma resumida se ocupan de:

- Estado del Arte. En este capítulo se describen las áreas sobre las que se trabaja y la documentación consultada. Se enumeran las principales fuentes y el por qué de su elección como fuentes fundamentales dentro de la ingente cantidad de documentación existente y en constante generación.
- Descripción del Estudio. El estudio se centra en la descripción de las principales tecnologías LPWAN, especialmente NB-IoT. Asimismo, para poder hablar de modelos de tráfico en estas redes, se describen los modelos y las fuentes de tráfico en estos sistemas y como utilizarlos como herramientas para diseñar una infraestructura con cierto grado de rendimiento.
- Estudio. Este amplio capítulo incorpora la descripción detallada de NB-IoT, una descripción mas somera de SigFox y LoRA, una comparativa entre estas tecnologías, una descripción de modelos de tráfico, su aplicación a IoT y un análisis de estudios existentes a este concepto en este ecosistema.
- Conclusiones. Se resumen las conclusiones principales del Trabajo Fin de Master, y se dan unas lineas de trabajo futuro
- Anexo I. Se ofrece una orientación para un trabajo futuro.

2 Estado del Arte

Para el desarrollo del Trabajo resulta conveniente conocer el estado tecnológico del ámbito en el que se centran sus contenidos.

Se parte de una descripción de IoT, de la evolución de las tecnologías de baja potencia y área extendida (LPWAN) y en concreto de NB-IoT. Estos tres conceptos están en auge y la cantidad de contenidos es elevada, aunque en muchos casos los factores diferenciales son mínimos, lo que dificulta encontrar datos concretos y novedosos sobre la evolución de la tecnología, su mercado, su evolución normativa, etc.

Además de lo anterior resulta interesante ver cómo se trata el tráfico generado por las distintas redes: definición, modelado, enfoques, y estudios realizados

De entre la bibliografía utilizada se podría señalar la siguiente dependiendo del punto del TFM en el que nos encontremos:

Tecnologías

Los documentos mas útiles para describir y conocer las tecnologías por separado.

DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS		
Publicación y autor	**Temática**	**Resumen**
[1]	NB-IoT	Descripción de NB-IoT. Arquitectura, aplicaciones y retos Comparativa con otras tecnologías
[2]	Intenet of Things	Internet de las cosas. Descripción y comparativa.
[36]	NB-IoT	Una visión de release 14.
[37]	NB-IoT	Visión y descripción de redes NB-Iot
[34]	LoraWan	Descripción de Lorawan e información relativa a integración en simulador
[25]	SigFox	Visión y descripción de SigFox. Comparativa.

Cada tecnología tiene fuentes de consulta donde encontrar un análisis pormenorizado de cada uno de sus rasgos. Un bit, una

frecuencia, un procedimiento de asignación de slot temporal, etc. Lo realmente difícil es reunir la información adecuada de cada tecnología en la media necesaria y para ello es quizá [1] y [2] los documentos que realizan una sintesis inicial de todas las tecnologías y se paran en NB-IoT en el grado necesario para este Trabajo. No obstante es en [36] y [37] donde se encuentran datos mas detallados sobre NB-IoT, especialmente los de la Release 14 que son los mas importantes para este estudio. En cuanto a las otras tecnologías es en [34] y [25] donde se han encontrado las mejores informaciones sintetizadas para este texto en relación a LoraWan y SigFox respectivamente.

Comparativas

Los documentos mas útiles para este trabajo que hacen comparativa entre las tres tecnologías LPWAN

COMPARATIVA ENTRE TECNOLOGÍAS		
Publicación y autor	**Temática**	**Resumen**
[35]	Redes LPWAN	Comparativa exhaustiva de redes LPWAN, centrada en NB-IoT
[2]	Intenet of Things	Internet de las cosas. Descripción y comparativa.

Cualquiera de los trabajos anteriormente mencionados para conseguir datos relativos a una tecnología concreta incluye datos de otras tecnologías LPWAN, pero a la hora de establecer comparación entre ellas y centrarse en NB-IoT es en [35] donde podemos encontrar una mayor información y un excelente trabajo y en [2] donde habría mas sintesis de información comparativa, aunque incluye factores fuera del interés de este trabajo.

Modelos de tráfico

Los documentos mas interesantes en relación al modelado de tráfico y su aplicación en redes IoT.

MODELADO DE TRAFICO Y APLICACIÓN A IoT		
Publicación y autor	**Temática**	**Resumen**
[3]	Tráfico en redes de comunicaciones	Analisis de modelos de tráfico. Historia. Fundamentos teóricos
[30]	Tráfico en redes	Aplicación y análisis de modelado

	IoT	de datos a fuentes de carácter IoT
[28]	Trafico HTC+MTC	Análisis y caracterización de tráfico en una Smartcity. Modelado de fuentes

Sin lugar a dudas en el texto de Alzate [3] donde se pueden encontrar los principios de modelado de trafico y su tratamiento general tanto matemático como técnico. No obstante en [30] es donde se describe el tráfico agregado de fuentes IoT o similar y, especialmente en [28] donde se puede encontrar una visión del trafico y su modelo de una SmartCity, en el sentido multitecnología dentro de IoT de gran interés y calidad a destacar.

Detrás de toda esta documentación hay una cantidad ingente de datos que permiten explorar las características de cada red.

No obstante no se han encontrados datos comparativos de los modelos de tráfico existentes para redes LPWAN NB-IoT, LoraWan y SigFox y es lo que pretende hacer el presente trabajo.

> *Definir los modelos de trafico aplicables a redes LPWAN y los parámetros susceptibles de ser estudiados para ver qué tecnología es mejor para cada modelo en los supuestos establecidos.*

Podría contemplarse como parte de una serie de trabajos fin de Master llevados a efecto por alumnos de la UOC que girando en torno a la LPWAN van desarrollando aspectos muy específicos de estas tecnologías.

El aspecto principal que ocupa este texto y que aporta a estado del arte es una síntesis de conceptos y guías de MODELOS DE TRÁFICO EN REDES LPWAN

3 Descripción del estudio

El avance las tecnologías ha dado lugar a un mercado emergente en torno a IoT que se llega a subdividir en categorías en función de una serie de parámetros que permiten manejar los millones de dispositivos potenciales integrables en una vida llena de multitud de servicios y prestaciones.

A la demanda y oferta cada vez mayor de servicios, tecnologías, etc. se auna la tendencia y necesidad de un desarrollo sostenible donde el uso optimo de la energía y el mínimo impacto medioambiental es requerimiento inexcusable de cualquier diseño.

La respuesta a lo anterior de IoT es la tecnología LPWA, siglas de Low Power Wide Area. El objetivo es dar conectividad a un elevado número de elementos, todo con o de bajo coste, en una zona de cobertura amplia minimizando el consumo de energía necesaria para ello.

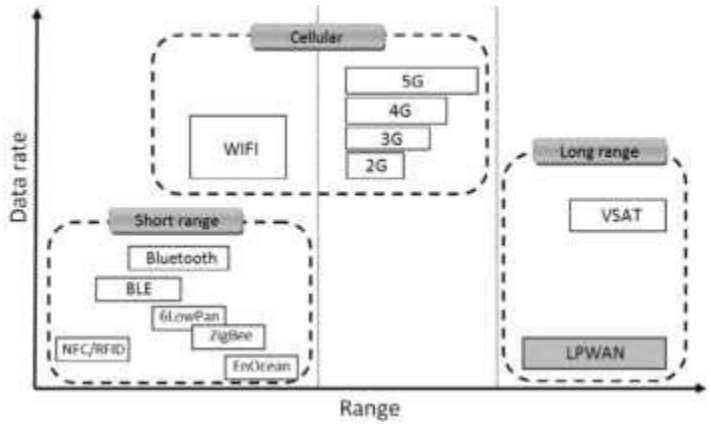


Figura 2 Tecnologias LPWAN . Relación con otras tecnologías [4]

Existen distintas soluciones en el mercado a modo de redes de área extendida tales como LoRa y Sigfox, ambas con tecnología propietaria y usando espectro no licenciado. Sin embargo la idea de tener que generar una nueva infraestructura para este servicio, tal y como las soluciones mencionadas establecen, han hecho que se plantease la opción de proporcionar LPWAN a través de alguna de las tecnologías de area extendida existentes y hacerlas evolucionar en dirección a IoT. En concreto se ha incluido en la evolución de recomendaciones de redes LTE por parte de su organismo generador, que es 3GPP, una vertiente específica para IoT: NB-IoT Narrow Band IoT, Internet de las Cosas de banda estrecha. Esta tecnología es una muy buena opción para el desarrollo de LPWANs por sus características de cobertura en interiores, su bajo consumo de energía, su tolerancia a la latencia y la capacidad de número de dispositivos integrables.

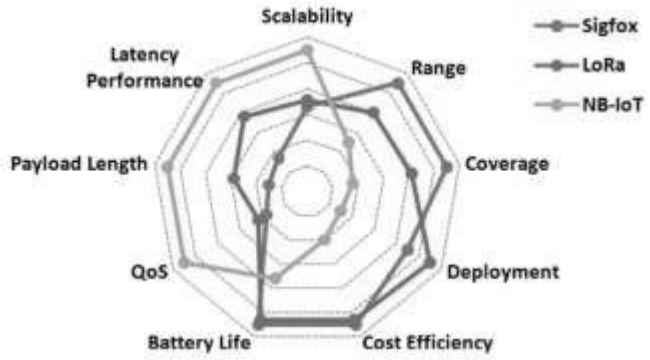


Figura 3 Comparativa principales tecnología LPWAN[4]

IoT, en ámbito de área extensa, además de dar lugar a redes especificas celulares independientes, se ha incorporado al desarrollo de las redes 5G como uno de sus segmentos de servicio más importantes. Los principales retos para este tipo de redes son

- las limitaciones de capacidad de cálculo, de procesamiento y de potencia de los dispositivos terminales o de usuario
- la diversidad de aplicaciones basadas en IoT, distinguiéndose dos clases fundamentales, tal y como se ha señalado mas arriba:
    - Critical IoT Applications, caracterizadas por la baja latencia y alta fiabilidad
    - Massive IoT (M-IoT) Applications, caracterizadas por una gran zona de cobertura para dispositivos de baja potecia y con diferentes requerimientos de latencia y ancho de banda necesario

Será el ámbito M-IoT el que parece tendrá mas desarrollo potencial y en el que habrá que pensar a la hora de definir la estructura 5G. Esta red celular que es la evolución de redes celulares para comunicaciones entre humanos (human to human H2H), debe adaptarse a las comunicaciones en las que los usuarios son las maquinas (Machine-to-Machine M2M, por ejemplo un sensor y una sistema de información para su gestión en una base de datos). Parámetros característicos de la comunicación como el retardo y el modelo de tráfico cambian sensiblemente, y la red celular debe ser capaz de proveer servicio a los distintos segmentos del mercado que se pretenden atender.

Los modelos de tráfico son aquellos modelos matemáticos que representan la realidad o intentan aproximarla para explicar la relación entre la capacidad de una red de comunicaciones, la demanda de servicio que los usuarios le imponen y el niel de desempeño que la red puede alcanzar (3). La demanda de servicio, sea cual sea el origen, tiene naturaleza estadística y se suele representar mediante procesos estocástios con los que se consitituyen los Modelos de Tráfico.

Coexisten por lo tanto redes específicas para IoT en área extendida como son Sigfox, LoRa o RPMA con redes que están creciendo conforme se va extendiendo la tecnología LTE y que introdujo su organización reguladora (3GPP) en la normativa correspondiente (Rel-13) a través de los nuevos conceptos eMTC (enhanced Machine Type Communication), NB-IoT y EC-GSM (enhanced coverage GSM), siendo NB-IoT la que esta mas orientada a M-IoT.

Por último, y a modo de visión general de la tecnología que nos ocupa en relación al mercado de IoT que esta cada dia mas en auge, cabe señalar lo indicado en [**1**]. Según este estudio, se espera un crecimiento del 81% entre los años 2018-2025 de las conexiones basadas en LPWAN, de las cuales, para ese año 2025 mas del 48% serán con NB-IoT:

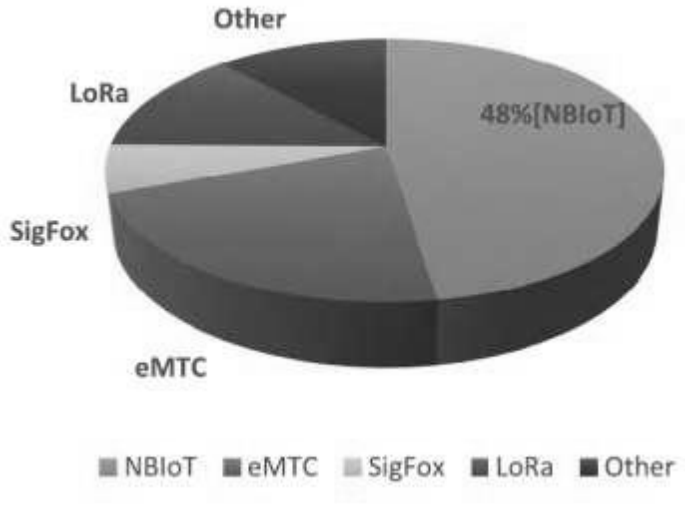


Figura 4 Distribución estimada del mercado LPWAN para 2025 [**1**]

3.1 Estudio de la tecnología NB-IoT

3.1.1 Descripción general NB-IoT

Narrow Band Internet Of Things (NB-IoT) es la tecnología que se plantea como la que puede dar servicio al mercado de las comunicaciones y aplicaciones M-IoT. Se define un interfaz integrado con LTE en sus distintas especificaciones [5] [6] que encaja las distintas características de las comunicaciones mMTC:

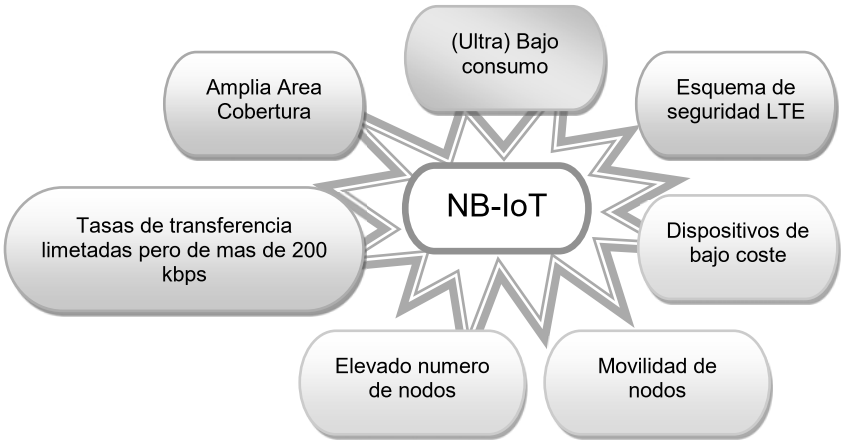


Figura 5. Características NB-IoT

Estas características son:

- Más de 52000 conexiones (dispositivos) por canal, aprovechando que los requerimientos de los dispositivos son limitados: poca cantidad de datos con poca frecuencia y cuya latencia no es crítica. Se proporcionan dos modos de operación: monótono o multitono (7), con hasta 12 subportadoras espaciadas 15 Hz o 48 subespaciadas 3,75 Hz en monotono. Esto permite que cada nodo B (eNodeB) puede dar servicio a un elevado número de dispositivos en paralelo
- Ancho de banda de 180 Khz al operar en HD-FDD, lo que hace mas sencillo el diseño de todo transmisor (por su bajo ancho de banda y funcionamiento en half-duplex que evita la necesidad de un duplexor que separe transmisión de recepción).
- Diseño de dispositivos orientado a una vida prolongada de su batería, reduciendo el consumo con el concepto de recepción discontinua extendida (externded discontinuos reception eDRX) y modos de funcionamiento que garanticen la conservación de la energía (PSM Power Saving Modes)
- Aumento de la cobertura en cerca de 20 dB respecto a GPRS, especialmente en instalaciones en interiores, 7 dB apoyándose en una reducción del ancho de banda y 13 dB en retransmisiones del bloque de transporte. Se utilizan retransmisiones multiples y una relación señal a ruido-interferencia SINR mejorada. En relación a las repeticiones para aumentar las extensiones en la zona de cobertura (CE coverage extensions) se definen tres clases CE level 0, level 1 y level 2 dependiendo del número de repeticiones.
- Coexistencia con LTE y 2G a través de distintos modos de despliegue: inband, standalone y modo in-band.
- Modelos sencillos de modulación (QPSK como mucho) que hacen los terminales más fáciles y baratos de fabricar

- Operación en banda licenciada con seguridad en comunicaciones
- Optimización en la señalización, apoyándose en el RRC (Radio Resource Control) de LTE pero usando DONAS (Data Over Non Access Stratum). Se permite la transmisión de datos sin activar el plano de usuario y con carácter esporádico, usando la parte de señalización el control para el transporte de datos de usuario.

3.1.2 Evolución de los estándares

Inicialmente NB-IoT surgió como una propuesta de QUALCOMM (NB-IoT OFDMA) y de Huawei y Vodafone (NB-IoT M2M). Posteriormente evolucionaron a una solución conjunta llamada NB celular IoT (NB-CIoT) con requerimientos específicos y sin compatibilidad con el LTE que se había desarrollado hasta entonces, que era hasta Rel12, lo cual supuso una barrera que se superó en 2016 cuando el organismo de estandarización 3GPP desarrollo NBIoT-LTE, evolucionando lo existente y compatible con LTE y ha terminado dando lugar a NBIoT.

Las comunicaciones MTC se introdujeron por 3GPP en LTE en 2005 [**8**] , aunque se generaron con unas capacidades de hasta 300 Mbps y unos anchos de banda de entre 1.4 y 20 Mhz. Inicialmente no se consideraron las posibilidades de dispositivos de bajo coste, sino que iban mas orientadas las especificaciones a equipos mas complejos y a servicios tales como los de servicio público (Public Warning System PWS), localización, autoconfiguración de red (Self Organizing Network SON). Se tendría que esperar a la Rel-10 para la mejora del ancho de banda y la tasa de transmisión, con la agregación de portadoras tanto para TD como para FDD y para reducir la interferencia mediante el eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination) y el uso de MIMO.

En las distintas Releases se han ido introduciendo características tanto de red, como de servicio, como tipos de dispositivo. Así en la Rel-12 ([11] 3GPP, feb 2015) se introdujo la supresión y cancelación de interferencia de red y para alcanzar la QoS se introdujeron dispositivos de usuario que reducían un 50% su coste respecto a los de la Rel-8 (cat-1 devices).

La siguiente tabla resume las mejoras introducidas por cada release, señalando especialmente el tipo de dispositivos manejados, por ser éstos los que van a marcar el desarrollo de NB-IoT, a partir de la Rel-13, de reciente factura.

Release	Año de Estandarización	Dispos.	Potencia TX, Ancho de banda, complejidad, Thoughtput DL/UL	Características
Rel-8	2006-2009	Cat-(1-5)	23 dBm, 20 Mhz, 100%, 10Mbps/5 Mbps	LTE, baja latencia, ancho de banda variable, OFDM en DL(300 Mbps), SC-FDMA en UL(75 Mps), MIMO, Multi-/Bradcast eficiente Modulación en amplitud y cuadratura -16 y 64
Rel-9	2008-2010	-		Femtocélulas, PWS, eMBMS, Location pingpointing, Estación base de acceso radio múltiple
Rel-10 (LTE-A)	2009-2011	Cat-(6-9)		CA, MIMO 8x8 y 4x4, mejoras en DL/UL T, cobertura y SD-FDMA, eICIC
Rel-11 (LTE-A)	2010-2013	Cat-9-12		EPDCCH para redes hererogeneas, selección de PDG basado en posición de UE, CoMP, IMS, WiFi integrado
Rel-12 (LTE-A)	2011-2015	Cat-13,-14, -0	23 dBm, 20 Mhz, 50%, 1Mbps/1 Mbps	Reducción carga de señal, mejora en throughtput esquema de modulación 256AQM para D2D, gestión de congestión, Internetworking de radio, elevarted veamforming, HetNet, introducción de PSM (Power Saving Mode)
Rel-13 (LTE-Advanced Pro)	2012-2016	Cat M1,**Cat-NB1**	M1: 20 dBm, 1,4 Mhz, 20%, 1Mbps/1 Mbps NB1: 23 dBm, 180 Khz, 15%, 200 Kbps/144 Kbps	NB-IoT, mejoras D2D, MIMO, cobertura en interiores, optimización uso batería, SC-PTM
Rel-14 (LTE-Advanced Pro)	2014-2017	Cat-NB2		Reducción de la latencia, MMIoT, reducción TTI, mejora precisión posicionamiento, mejora tasas pico de transferencia, nuevas clases de dispositivos, operación no anclada en portadora, Autorizació muticast entre las mejoras de cobertura, servicios broadcast, etc,
Rel-15	En proceso	-		Misson Critical, Communication Internetworking, candcelación de interfrencia, agregación portadora entre banda, Arial vehicle Assitance, Security Assurance

Tabla 1 Resumen Releases LTE hacia NB-IoT [5]

Los dispositivos para redes de baja potencia (Cat M para eMTC y Cat-NB1 para NBIoT) se introdujeron en la Rel-13, donde ya se establecía una reducida complejidad de dichos dispositivos, una cobertura de 15 dB y su gestión en escenarios de cobertura pobre, con mejoras en la gestión de baterías con la escucha controlada (eDRX) y la gestión del estado de funcionamiento de bajo consumo (sleep) .

3.1.3 Arquitectura de red NB-IoT

La arquitectura troncal de NB-IoT es la misma que la de la red LTE, denominada EPC (Evolved Packet Core), pero optimizada para despliegue masivo de dispositivos, que permita trasmisiones cortas de datos de las aplicaciones M-IoT optimizando los planos de usuario y de control.

Su estructura básica es la que aparece en la figura:

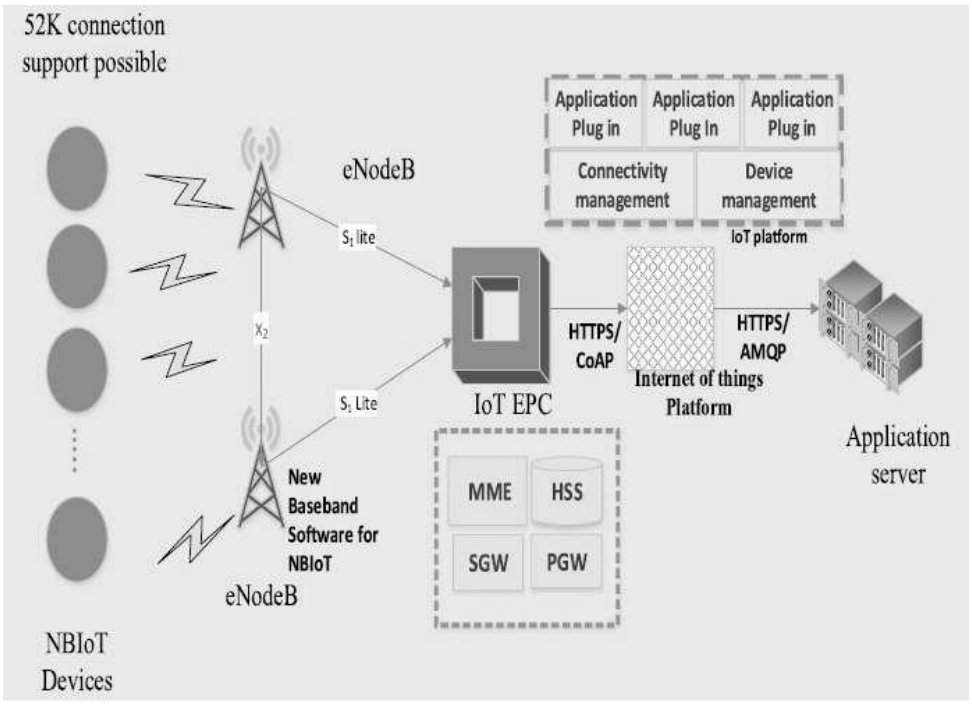


Figura 6 Arquitectura NBIoT [1]

Las comunicaciones fluirán desde el dispositivo NBIoT al nodo B (eNodeB) y de ahí al EPC. Esto implica al Serving Gateway, Packet Data Network GW, la entidad del plano de gestión de movilidad y el Home Subscriber server. Básicamente sería así:

- Dispositivo enlaza con eNodeB usando la capa o nivel de acceso (Access Stratum - AS) que gestiona los recursos radio mediante el protocolo RRC. Este protocolo configura los plano de control y usuario en el resto del proceso. Parte de dos estados:
  - IDLE (accesible desde la red pero sin emitir) y
  - CONNECTED (localizable a nivel de celda y con posibilidad de TX/RX)
- eNodeB hace uso del protocolo o nivel (Non-Access Stratum) NAS para pasar al EPC usando el interfaz s1-lite para gestión de sesión y movilidad con el MME. Se trata de un nucleo de red optimizado para NB-IoT (CIoT) que proporciona funciones combinadas de los planos de control y usuario y auna elementos típicos del EPC.
- Se pasa a un plano de usuario en la plataforma IoT para llegar a las aplicaciones y sus servidores, bien sea con IP o Non-IP, siendo esta última la mas adecuada al reducir las cabeceras en el equipo de usuario y ser una transmisión mas segura. El uso de NAS mejora la transferencia

convencional de datos a los nuevos elementos de la red para este tipo de dispositivos.

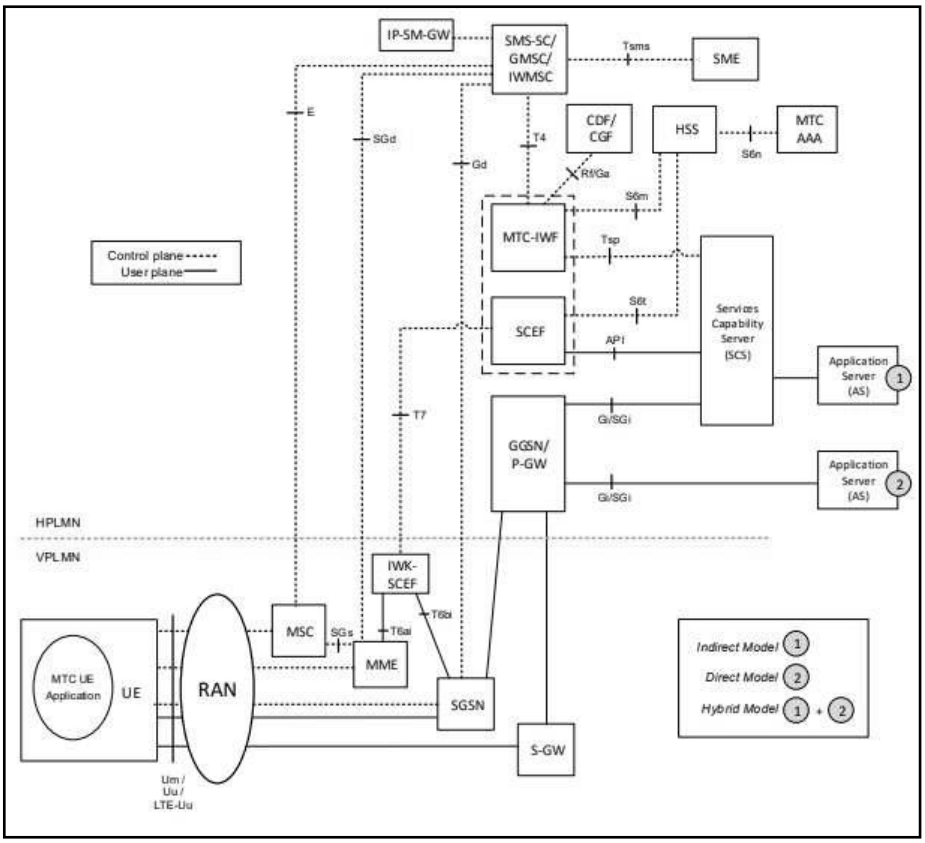


Figura 7 Arquitectura NBIoT [9]

3.1.4 Frecuencias para NB-IoT

Las 25 bandas para las que se han definido NB-IoT se han ido incorporando progresivamente y actualmente serían: 1-5,8,11-14,17,20,25,26,28,31,66,70-74,85.

La siguiente tabla muestra las bandas y frecuencias para el enlace de subida UL y bajada DL y su correspondiente esquema de modulación y comunicación (bidireccional alternado con multiplexación por división en frecuencia HD-FDD)

NB Band	*UL*	*DL*	*Duplex Mo*de
B1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	HD-FDD
B2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	HD-FDD
B3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	HD-FDD
B4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	HD-FDD
B5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	HD-FDD

B8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	HD-FDD
B11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	HD-FDD
B12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	HD-FDD
B13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	HD-FDD
B14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	HD-FDD
B17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	HD-FDD
B18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz -875 MHz	HD-FDD
B19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	HD-FDD
B20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz -821 MHz	HD-FDD
B25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz -1995 MHz	HD-FDD
B26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	HD-FDD
B28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	HD-FDD
B31	452.5 MHz – 457.5 MHz	462.5 MHz – 467.5 MHz	HD- FDD
B66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	HD-FDD
B70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	HD-FDD
B71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 783 MHz	HD-FDD
B72	451 MHz – 456 MHz	461 MHz – 466 MHz	HD-FDD
B73	450 MHz – 455 MHz	461 MHz – 465 MHz	HD -FDD
B74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz -1518 MHz	HD- FDD
B85	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	HD-FDD

Tabla 2 Asignación de frecuencias y bandas asociadas a NB-IoT

3.1.5 Nivel físico: datos y estructura general de trama

El nivel físico esta orientado al bajo consumo en dispositivos de bajo coste con un canal de 180 kHz. Distingue un canal descendente (con subportadoras cada 15 kHz) y uno ascendente (con subportadoras separadas o 3.75 kHz o 15 kHz)

3.1.5.1 Canal descendente: datos y estructura general de trama

Es igual a la de LTE:

- en el dominio del tiempo 1024 tramas radio (RF) de 10 msg compuestas por 10 subtramas (SF) de 1 msg, cada una de las cuales con 2 slots de 0.5 msg y albergar 7 símbolos

OFDM, cada uno de los cuales se denominan RE (resource element). Estos RE se definen como una subportadora en un símbolo OFDMA conforme al esquema de modulación. Además existe el concepto de hipertrama, con 1024 periodos de trama de sistema y que suponen casi 3 horas.

- En el dominio de la frecuencia cada recurso físico supone 12 subportadoras consecutivas espaciadas 15 kHz.

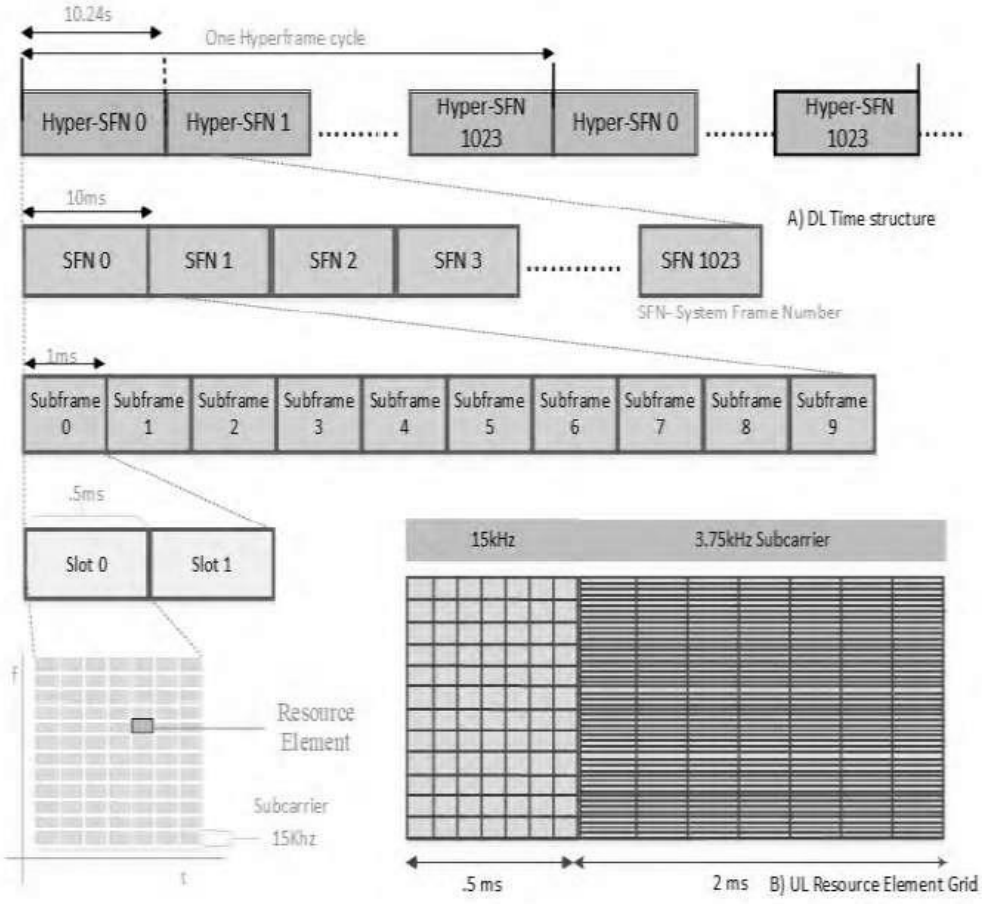


Figura 8 Estructura de trama NB-IoT [10]

3.1.5.2 Canal ascendente: datos y estructura general de trama

De la misma manera que el anterior se disponen de 180 kHz de ancho de banda, donde se usa SC-FDMA (Single Carrier Frecuency Division Mutiple Access) para dar dos modos de operación:

- Multitono. Con espaciado de 15 khz cada slot es de 0.5 ms con 12 subportadoras igual al ya visto en el punto anterior. Permite agrupar 3,6 o 12 subportadoras.
- Tono único. Con espaciado posible de 15 o 3.75 kHz Esta última difiere de la de 15 kHz en: 1 trama incluye 5 slots, y cada slot siete símbolos

La duración mínima de las unidades de recursos dependen del modo de operación y el número de subportadoras asignadas. Asi se establece el grid de recursos de 15 kHz (igual que el downlink) y el de 3.75 kHz:

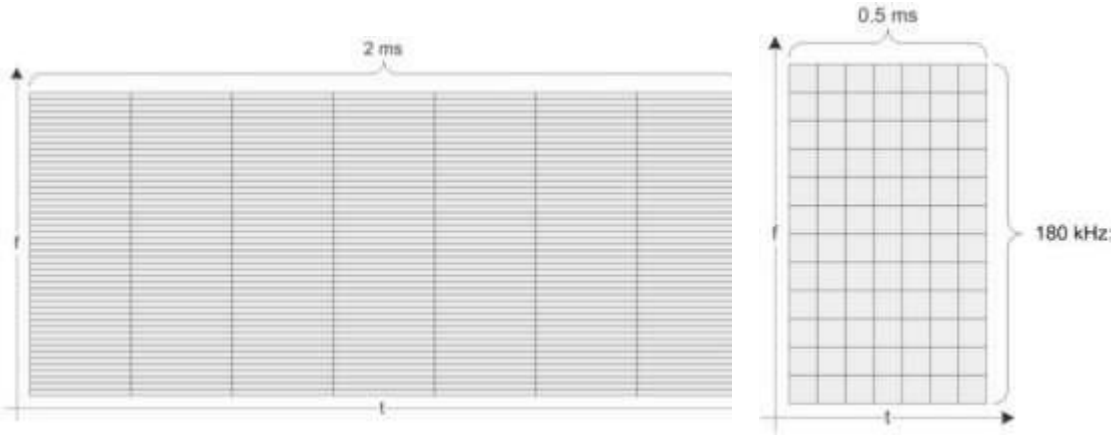


Figura 9 Grid de recursos. Espaciado 3.75 kHz (izda) y 15 kHz (drcha) [10]

3.1.6 Nivel físico: canales y señales

3.1.6.1 Canal ascendente: canales y señales

Dado que NB-IoT esta pensado para zonas de cobertura extensas donde se optimiza el uso de la energía y el consumo de baterías en los dispositivos, éstos no solicitan canal, sino que solo dan confirmación (o no) y utilizan sólo dos canales UL: NPRACH y NPUSCH y una señal de referencia de demodulación DMRS. En esos canales se implementan los canales de datos

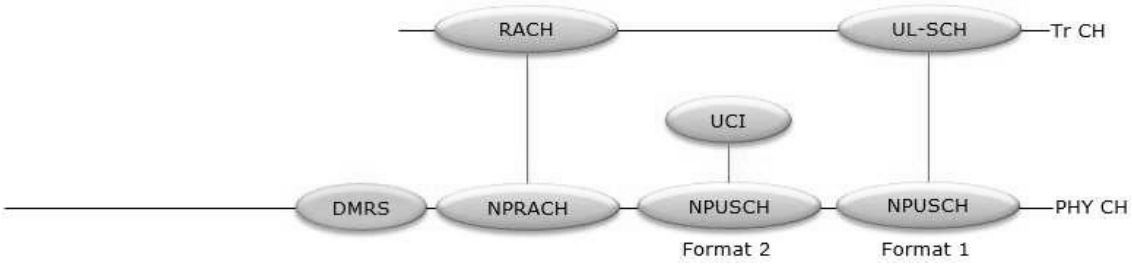


Figura 10 Canales físicos y de transporte en UL [17]

3.1.6.1.1 NPRACH: Narrowband Physical Random Access Channel

Este canal NPRACH se utiliza para aludir a un recurso tiempo-frecuencia que ocupa un grupo de portadoras (12, 24, 36 o 48) y transmitir los preámbulos de los accesos aleatorios al sistema por parte del dispositivo de usuario (NB-IoT UE). Cada preámbulo es un grupo de cuatro grupos de símbolos, cada uno de los cuales con un prefijo (Cycle Prefix CP) y 5 símbolos. Este preámbulo se repite con una periodicidad que va de 0.04 a 2.56 segundos y que

permite a un eNB (nodo de red) estimar el timing del canal de subida cuando un terminal de usuario lo emite.



Figura 11 Preambulo NPRACH [16]

El acceso aleatorio comienza con la transmisión de un preámbulo durante una duración de 5.6 o 6.4 mseg, que permitirá un CP de longitud variable (66.7 µseg para celdas de 8 km de radio máximo o 266.7 µseg para celdas de entre 8 y 35 km) para permitir distintos tamaños de celda.

Cada símbolo se modula en un tono de 3.75 kHz, y varía entre las distintas subportadoras del grupo de 12. Este salto entre frecuencias va a permitir una estimación del TOA mas optimo, así como una mejor sincronización con el eNB. En este sentido se definen dos niveles de patrones de salto: uno interno (TOA grueso con valores fijos y pequeños) y otro externo (para un TOA preciso). Dependiendo del nivel de cobertura la celda puede indicar al NB-IoT UE que repita el preámbulo 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128 veces con la misma potencia.

Los saltos en frecuencia reducen la interferencia entre celdas de la misma manera que en LTE.

Además se pueden repetir los preámbulos de cuatro símbolos hasta 128 veces para dar una cobertura de +20dB GPRS.

3.1.6.1.2 NPUSCH: Narrowband Physical Uplink Shared Channel

Este canal soporta la transmisión en un tono único (con 3,75 kHz o 15 kHz) o multitono con un espaciado de 15 kHz entre subportadoras.

Este canal tiene dos formatos:

- formato 1.- los datos sobre un bloque de tamaño máximo de 1000 bits y posible multitono con 3, 6 o 12 tonos. Además se puede usar un esquema de modulación de π/2-BPSK o π/4-QPSK sobre un único tono y QPSK para multitono.
- formato 2.- información de control, sobre tono único con UCI de 1 bit para la confirmación de la solicitud automática HARQ para la transmisión sobre el canal NB-PDSCH

Estos formatos permiten una mayor vida de la baterías, capacidad de servicios masivos y cobertura extendida.

A modo de resumen podemos ver las siguientes tablas

Format	Sub spacing	Sub carriers	Slots	Slot time	Resource Unit time	Channel coding	Modulation scheme
Format 1	3.75 kHz	1	16	2	32	Turbo 1/3	π/2-BPSK π/4-QPSK
	15k Hz	1	16	.5	8		QPSK
		3	8	.5	4		
		6	4	.5	2		
		12	2	.5	1		
Format 2	3.75 kHz	1	4	2	8	Block 1/16	π/2-BPSK
	15	1	4	.5	2		

Figura 12 Formatos NPUSCH [1]

< 36.211-10.1.2.1 >

$n_s \in \{0,1,\ldots,19\}$ for $\Delta f = 15\,\text{kHz}$

$n_s \in \{0,1,\ldots,4\}$ for $\Delta f = 3.75\,\text{kHz}$

< 36.211-Table 10.1.2.1-1: NB-IoT parameters >

Subcarrier spacing	N_{sc}^{UL}	T_{slot}
$\Delta f = 3.75\,\text{kHz}$	48	$61440 \cdot T_s$
$\Delta f = 15\,\text{kHz}$	12	$15360 \cdot T_s$

< 36.211-Table 10.1.2.3-1: Supported combinations of N_{sc}^{RU}, N_{slots}^{UL}, and N_{symb}^{UL} >

NPUSCH format	Δf	N_{sc}^{RU}	N_{slots}^{UL}	N_{symb}^{UL}
1	3.75 kHz	1	16	7
	15 kHz	1	16	
		3	8	
		6	4	
		12	2	
2	3.75 kHz	1	4	
	15 kHz	1	4	

Figura 13 formato NPUSCH [17]

Si se sabe interpretar los valores de las tablas (N_{sc}- numero subportadoras, T_{slot}.- tiempo de slot, N_{slots}.- numero de slot) y plasmarlo en el grid de recursos (RU resource unit) se puede visualizar la estructura de la trama. Habrá dos tramas, una para espaciado entre subportadoras de 15 kHz y otra para 3,75 kHz.

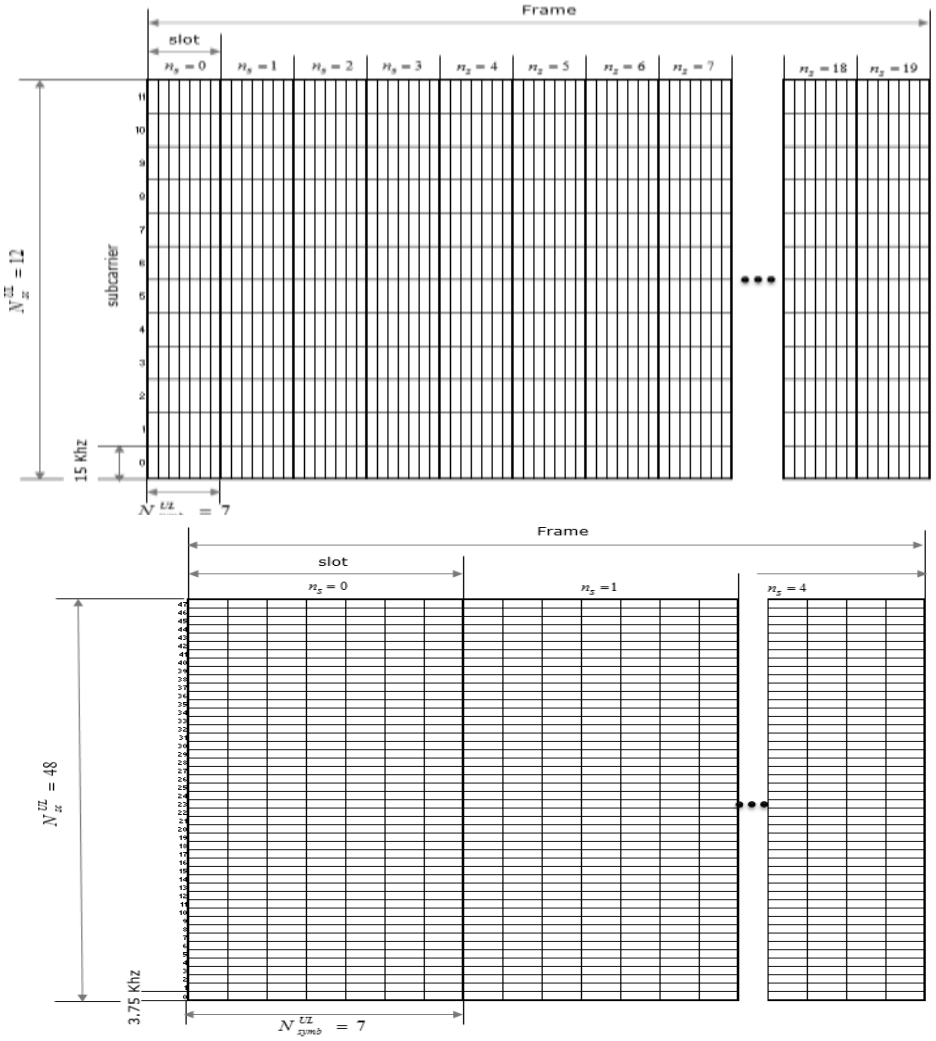
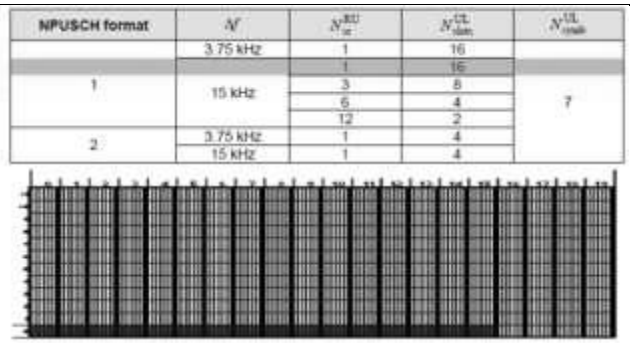
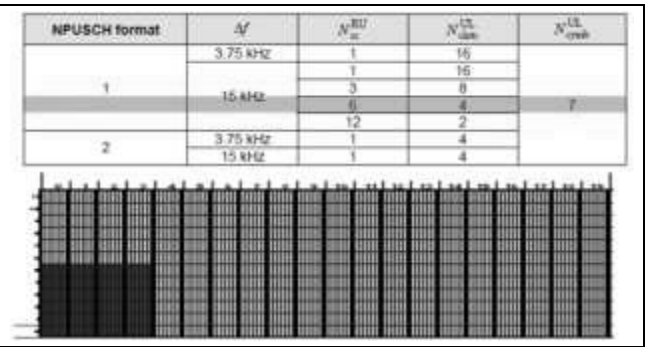


Figura 14 Grid de recursos dentro de la trama del NPUSCH

Se puede comprobar que con 3,75 kHz, respecto a 15 kHz:

- el espaciado entre subportadoras es 4 veces mas ancho
- la longitud de simbolo es 4 veces mayor
- la longitud de la trama radio es la misma (10 ms)
- el numero de slot dentro de la trama es 4 veces menor.
- el numero de símbolos OFDM dentro de un slot es el mismo en ambos

Se puede caracterizar cada RU como unidad basica de localización dentro del PUSCH. Asi por ejemplo [**17**]:

	
Formato 1 15 kHz →numero de subportadoras en un RU es 1 y numero de slots dentro de la RU 16	Form. 1, 15 kHz →Número de subportadoras en un RU 6 número de slots dentro de la RU es 4

3.1.6.1.3 DMRS: Demodulation Reference Signal

En LTE esta señal se usa para otener repuesta de canal. En NBIoT esta señal la multiplexa el UE con los simbolos (datos) del NPUSCH. Dependiendo del formato del NPUSCH se usaran 1 o 3 simbolos por cada slot SC-FDMA para esa señal DMRS.

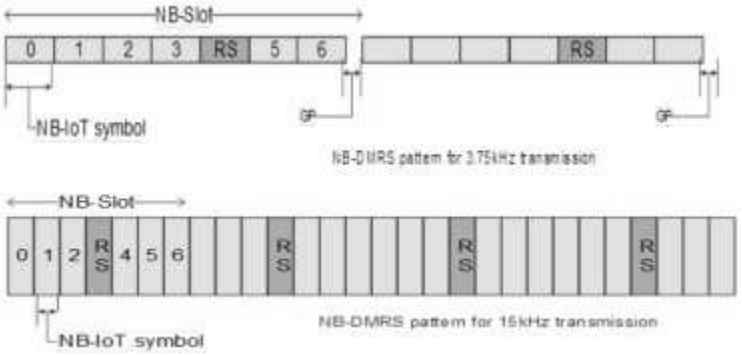


Figura 15 Loc. DMRS en NPUSCH. Espaciado de 15 y 3,75 kHz [18]

3.1.6.2 Canal descendente: canales y señales

Se trata de los canales fisico y de acceso al medio analogos a LTE pero para NBIoT (PHY y MAC), lo que supone menor complejidad. Se ajusta a los 180 kHz y se procura mejorar la cobertura. Se definen

- 3 canales físicos:
  - NPBCH – para la información maestra (MIB – Master Information Block)
  - NPDCCH – para control de enlace descendente en la transferencia de datos UE-eNB
  - NPDSCH – para el resto de información y datos
- 2 señales físicas:
  - NPSS y NSSS para sincronización primaria y secundaria
  - NRS para referencia

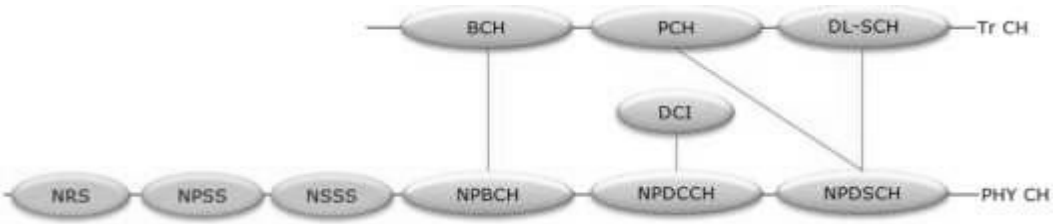


Figura 16 canales y señales del enlace de bajada NBIoT [17]

Con relación a las señales cabe señalar

- el reto en este enlace es la sincronización y más con dispositivos de bajo coste que disponen de osciladores de poca precisión que pierden la referencia durante largos periodos de desconexión en aras de un bajo consumo. Su precisión oscilará entre ±5 y ±100 ppm, con factores como la temperatura que lo harán más crítico.

  Para ello se han incorporado señales como NPSS que se transmite en la subtrama 5 con una duración de 1 ms con una periodicidad de 10 ms para su patron de secuencia y un espaciado de 15 kHz en portadora.

  La secuencia se genera usando una secuencia de Zadoff-Chu de longitud l=11 y $P_k = Q(k)e^{-j\pi vl\,(l+1)/11}$. Cabe destacar que la detección conllevara el consumo de casi el 24% de la batería del dispositivo, por lo que se hará sin atender a célua alguna, sino que habrá una misma señal para todas las células, de la que se tomarán 19200 muestras en la subtrama de 10 mseg, con una tasa de muestreo de 1.92 Mhz.

- Para la identificación de la célda (hasta 504 celdas identificables con una secuencia de Zadoff-Chu independiente de la secuencia primaria) e información adicional de la trama, se ha incorporado la NSSS (Narrow Secondary Synchronization Signal). Esta señal va en la subtrama 9 con una periodicidad de 20 msg, en intervalos de repetición de 80 msg y distinguiendose por el desplazamiento en fase. Utilizan los últimos 11 simbolos que suponen 132 RE.

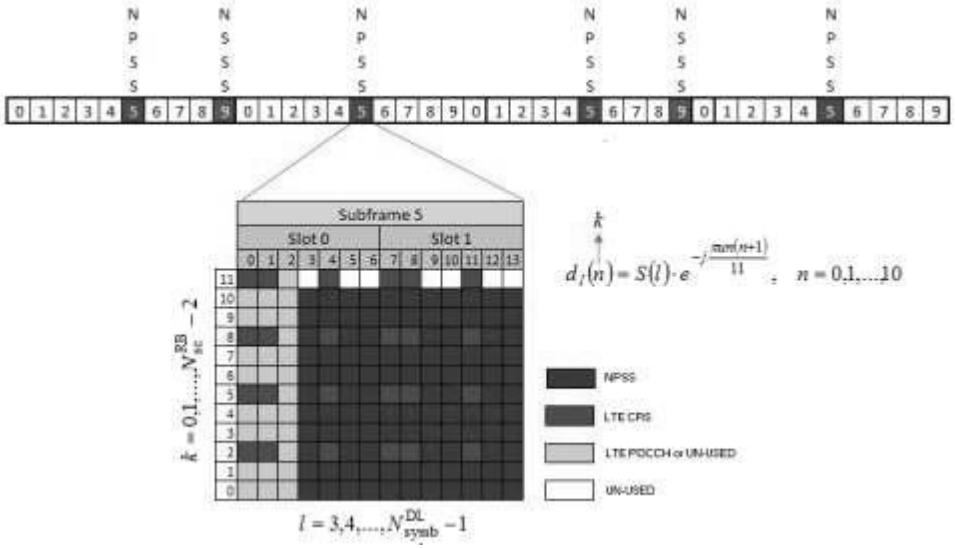


Figura 17 Localización de señales de sincronización en el downlink [17]

- La señal **NRS** (referencia de banda estrecha) se retransmite en todos los enlaces y canales broadcast y de bajada, incorporando la identificación de celda NCeIID.

En general localizaremos las distintas señales y canales en el enlace de bajada conforme a la siguiente figura:

	Subframe 0	Subframe 1	Subframe 2	Subframe 3	Subframe 4
Even Frame	NPBCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH
	Subframe 5	Subframe 6	Subframe 7	Subframe 8	Subframe 8
	NPSS	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH

	Subframe 0	Subframe 1	Subframe 2	Subframe 3	Subframe 4
Odd Frame	NPBCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH
	Subframe 5	Subframe 6	Subframe 7	Subframe 8	Subframe 9
	NPSS	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NSSS

Figura 18 Canales y señales en el downlink NB-IoT [17]

3.1.6.2.1 NBPBCH: Narrow-Band Physical Broadcast Channel

Este canal se localiza en la subtrama 0 de cada trama radio y lleva el bloque de información maestra (Master Information Block MIB), que suministra información sobre ancho de banda del sistema, el SFN (System Frame Number), número de antenas, etc. En concreto el MIB son 8 bloques independientes de 80 msg de duración, donde cada bloque se repite 8 veces seguidas para asegurar servicio en zonas de cobertura comprometida. Resulta emitida la misma MIB durante 640 msg.

Asimismo se suministra información de operación como:

- El numero de trama del sistema SFN
- Numero de hipertrama
- Scheduling y tamaño SIB1-NB
- Etiqueta de información del sistema

- Modo de operación
- Etc.

y otras funcionalidades como generación de CRC, codificación convolucional (TBCC Tail Biting Convolucitional codes), ajuste de tasa (rate matching), aleatorización, modulación, mapeado de nivel, etc.

3.1.6.2.2 NPDCCH: Narrow-Band Physical Downlink Control Channel

Este canal es utilizado para información de control del enlace de bajada (Downlink Control Information DCI), y ofrecer a los UE tres tipos de información:

- Para quién hay información en el NPDSCH, dónde encontrarla y con qué frecuencia se repite.
- Recursos asociados a la comunicación con ese UE en el uplink
- Recursos asignados del PCH y del DLSCH

Es un canal con características heredadas de LTE-MTC, pero propio de NB-IoT, para información de planificación. Es un canal orientado a paquetes que solo funciona en modo HDD.

El tamaño maximo del DCI es de 23 bits para minimizar el consumo de energía en el lado de UE, definiendose 3 formatos de DCI:

Formato	Uso
N0	Planificación de NPUSCH en el UL de una celda en relación a recursos, modulación, repetición y codificación
N1	Planificación del code-word en una celda. Avisa de la presencia de datos en NPDSCH
N2	Paging y dirección

Tabla 3 Formatos DCI NPDCCH.

El NPDCCH consta de elementos del canal de control o NCCEs donde los RE se mapean y asignan. Cada trama tiene dos NCCEs similares a las seis subportadoras superiores y las seis inferiores para el mapeo de NCCE.

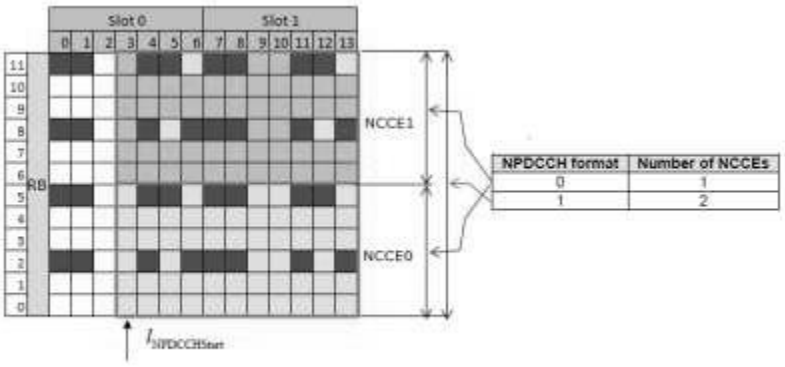


Figura 19 Estructura NPDCCH [11] [12]

3.1.6.2.3 NPDSCH: Narrow-Band Physical Downlink Shared Channel

El NPDSCH es el canal principal de transporte de datos de capas superiores, para la trasmisión de datos unicast (paging channel PCH), información broadcast como la información del sistema (System Information Blocks SIB-NBs) o el mensaje RAR (dentro del proceso de acceso aleatorio - Random Access process -) para nos NB-IoT UE. Tiene la misma estructura que el NPDCCH.

Datos

Los paquetes de datos se dividen bloques (TB) que se transmiten uno cada vez, con un tamaño maximo de 680 bits aunque el NPDCCH puede multiplexar recursos en una subtrama para dos mensajes DCI.

El TB se integra de la siguiente manera:

- se añade un CRC de 24 bits al TB
- se codifica con el codigo convoucional de LTE TBCC y
- se ajusta a la trama conforme a los parametros de longitud de palabra de codigo según el numero subtramas de NPDSCH asignados al TB y RE por subtrama. Esto va a determinar la tasa de codificación.
- Una vez codificados, se aleatoriza repitiendo la subtrama un numero de veces antes de mapear. Esta repetición, que puede oscilar entre 4 y 2048 veces, da lugar a una SNR de -12.6 dB

NRS

Se incorpora tambien una referencia de fase llamada NRS para la demodulación de los canales de bajada y que se multiplexa con la información que viaja en NPBCH, NPDCCH y NPDSCH con 8 RE por ubtrama por puerto de antena.

No hay acuse de recibo automático en el downlink, el eNB lo indica en la DCE, a la vez que la temporización y la subportadora asociada. A esto el UE transmite acuse de recibo.

Random Access Process y RAR

Se permite el uso de una portadora cuando el UE esta conectado (portadora múltiple). Mas adelante se describirá el proceso, pero groso modo, el UE inicialmente se fija en la portadora NBIoT desde la que recibió sincronización e información de transmisión (anclaje) y espera para iniciar el acceso transmitiendo un preambulo en la portadora uplink asociada que se indica en el SIB2-NB.

SIB-NBs

Ejemplos de información de sistema es, por ejemplo (13):

- SIB1-NB – proporciona información como el Tracking Area Code (TAC), identidad PLMN y del resto de SIB-NBs. Tiene una duración de 2560 msg y se mapea en las subtramas 4 de 16 tramas consecutivas. Se pueden usar para la transmisión distintas modalidades (indicadas en el MIB-NB) para mapear en 1,2 o 4 subtramas con 16, 8 o 4 repeticiones respectivamente.
- SIB2-NB – contiene información relativa al canal de paging y al proceso de acceso aleatorio.

3.1.7 Nivel físico. Resumen de canales y señales

Una vez vistos los distintos canales y señales, resulta interesante una visión de una trama a modo de resumen para un caso concreto en la siguiente imagen [**13**]

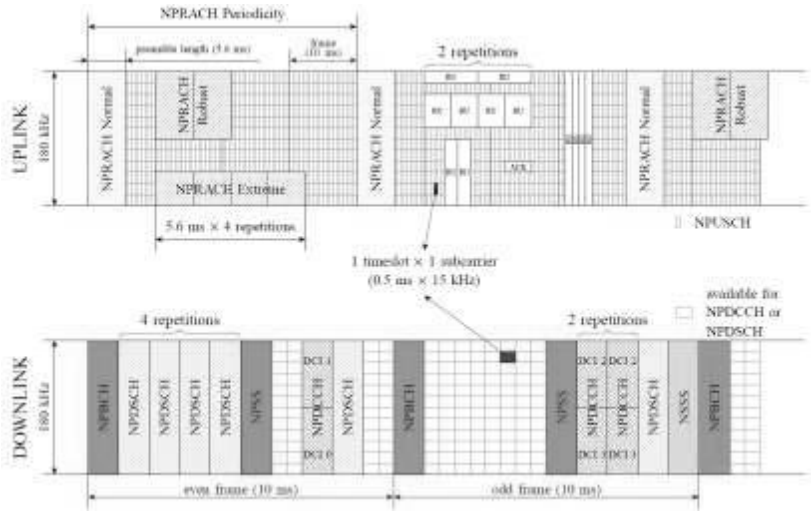


Figura 20 Canales UL y DL, con subportadoras de 15 kHz, preambulo formato 0 y dos DCI en cada subtrama NPDCCH [13].

3.1.8 Modos de operación y despliegue

Las portadoras para NBIoT pueden usar tres opciones de despliegue, acomodándose a que los 180 kHz sea un bloque de recursos de transmisión LTE y dentro del espectro GSM, LTE y WCDMA, definiéndose tres modos de operación y despliegue:

- Stand-alone: con un espacio dentro del espectro únicamente para NBIoT, como podría ser una portadora de LTE o GSM. Es la opción barajable para la reutilización de un canal GSM y aprovechar su comportamiento en frecuencia.
- In Band: con un bloque de recursos de una de las portadoras LTE, haciendo un uso mas eficaz del espectro. En concreto las bandas LTE no utilizadas para el bloque de información de sistema 1 son loas utilizadas para este tipo de despliegue. Las interferencias entre NB-IoT y LTE se pueden minimizar con una planificación de usuarios de recursos con requerimientos SNR parecidos y PRB LTEs similares.
- In Guard Band: aprovechando los 100 Khz de banda de guarda que tiene cada portadora LTE para evitar interferencias. Este modo es el que mejor tasa de bajada ofrece por disponer de mas recursos asignables.

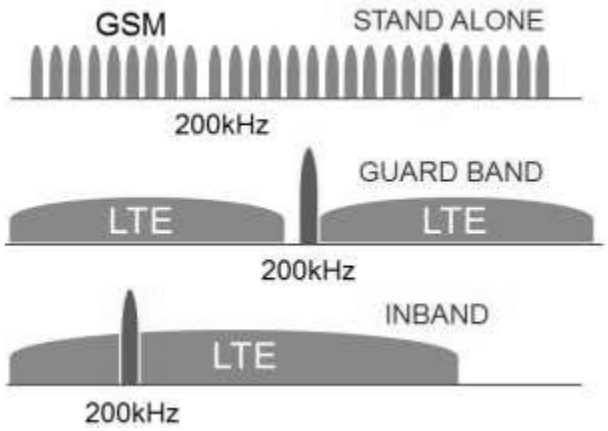


Figura 21 Modos de despliegue o de operación para NB-IoT

3.1.9 Control de potencia y energía

El ahorro de potencia y la conservación de la energía almacenada en las baterias de los NBIoT-UE es fundamental para las redes LPWAN. En linea con esto se ha ido introduciendo en las distintas Rel. características como modo de ahorro de potencia (PSM power saving mode) o recepción discontinua modo extendido (Extended Discontinuos Recepction eDRX).

Los dispositivos que estan en PSM dejan de estar activos y no reciben nada, pero permanecen registrados en la red, con lo que

no necesitan volver a establecer la conexión cuando pasan a modo activo, evitando asimismo la congestión de la red.

El control de actividad se lleva a cabo con temporizadores cuyos valores se ven ajustados por los periodos de TAU (Tracking Area Update) o periodo entre datos enviados; y PSM, que depende de otros temporizadores que verimos mas abajo.

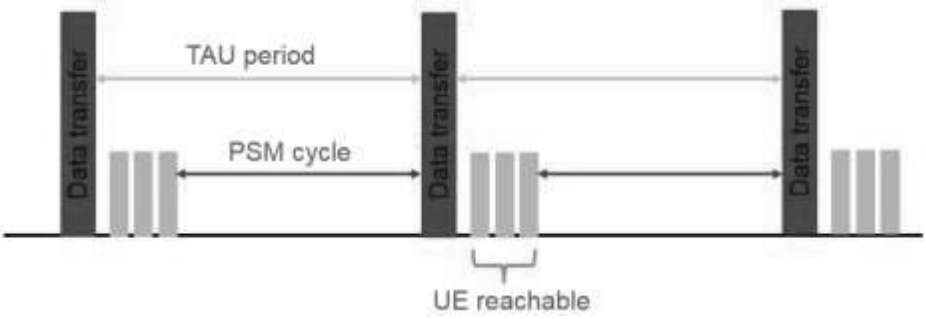


Figura 22 Relación TAU – PSM [6]

Estos valores son configurables y adaptables a las situaciones que se vayan generando.

Así se dispone de un temporizador activo (T3324 valor maximo 186 minutos) y uno extendido que equivale al tiempo de no activo (T3412 cuyo valor maximo podría ser de 413 dias)

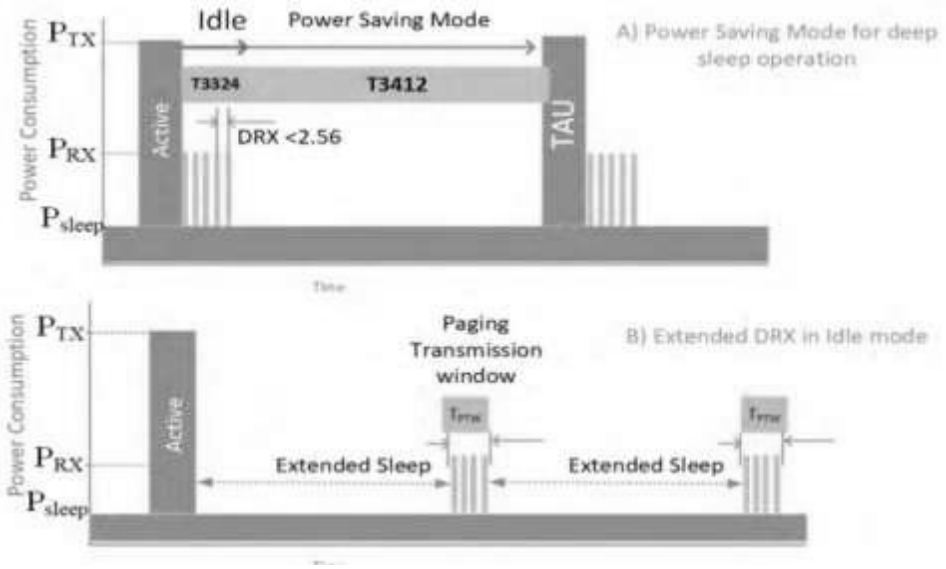


Figura 23 Modos PSM y Edrx [1]

Estos valores se irán ajustando por la red para garantizar la capacidad de respuesta de los dispositivos y el control efectivo de ellos y su estado de operatividad.

El modo eDRX reduce la peridicidad con la que un dispositivo entra en activo, ampliando los ciclos de inactividad, consiguiendo un ahorro de hasta el 43% respecto a otros modos de funcionamiento.

Ademas de lo expresado mas arriba se dispone de un control de la potencia transmitida:

- por parte del NBIoT-UE (uplink). Este valor dependerá del numero de repeticiones, del ancho de banda del RU seleccionado, de los parámetros dados por el RRC.
- por parte del NRS (downlink) para permitir al UE calcular las perdidas, pues su valor se incluye en la trama y dependerá del esquema de transmisión.

3.1.10 Conexión y transferencia de datos NB-IoT

Para ver el desarrollo e intercambio de información entre un elemento y la red NB-IoT se pueden establecer varias etapas

Selección y Acceso a Celda

Cuando un dispositivo pasa a activo se remite a una frecuencia apropiada de la ultima utilizada (MRU Most Recently Used), lee la información SIB e inicia el proceso de acceso aleatorio para una conexión RRC, tras la cual se registrará en red a través de la capa NAS.

Caso de ser la primera conexión del dispositivo o no encontrar celda adecuada se hace una búsqueda de frecuencia para sincronizarse con ella. Este paso supone la sincronización temporal con una estimación del offset (CFO carrier frequency offset) que suele ser elevado por las características limitada del oscilador de los equipos de usuario dado su bajo precio. En las peores condiciones se recuperan un elevado numero de tramas NPSS hasta encontrar el tiempo de símbolo, compensar el CFO y superar el desplazamiento de trama que puede ser de hasta 7.5 kHz (este desplazamiento puede suponer una sobrecompensación de la frecuencia portadora y una detección del NPBCH ineficaz con latencia superiores al prefijo cíclico y una perdida de ortogonalidad para la modulación OFDM). Para verificar el desplazamiento de trama se realizan calculos de hipotesis de situación de trama.

Una vez adquirida la sincronización NPSS, via la subtrama 9 se identifica si es una trama par o impar, y dado que hay 504 Cell-id´s posibles el algoritmo de detección de NSSS trabaja con 4032 hipotesis posibles. Esto le da al dispostivo la Cell-id y la localización del NRS, se demodula NBPCH y se obtiene el MIB-NB para acotar a las 8 hipotesis que serán referidas como *blind decoding*. La MIB-NB (34 bits en 64 tramas radio) informa del modo de operación (stand-alone, in-band, guard-band), planificación SIB1

(que incluye el area de busqueda, la identificación de celda y otros datos para la identificación univoca dentro de la red (PLMN)), etiqueta SI, información Access Barring, temporización del sistema en el SFN y el tamaño de bloque de transporte y numero de repeticiones.

El SIB1-NB se tramsite en la subtrama 4 de 16 tramas contiguas y ademas con una periodicidad de 2560 ms (256 tramas radio) que comienza con el Cell-ID. Por lo tanto, a partir de la adquisición el SIB1-NB se consigue la sincronización, cuyos cambios se notificarán por paging o las etiquetas correspondientes.

Se puede representar de la siguiente manera:

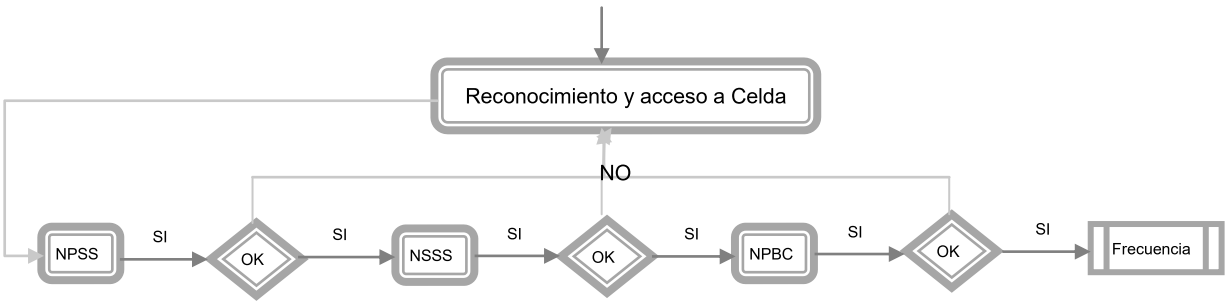


Figura 24 Reconocimiento/adquisición de celda [1]

Procedimiento de acceso aleatorio

El procedimiento de acceso aleatorio (RAP Random Access Procedure) se inicia a nivel MAC (o su subnivel RRC) una vez se conocen los recursos disponible en el PRACH. Se usará este procedimiento para tareas como el acceso incial, la solicitud de scheduling o conseguir la sincronización del uplink. Los recursos que se asignen dependerán de la medida de potencia de la señal recibida (Received Signal Received Power) que determinarán el nivel de cobertura soportada por la célula. Un dispositivo usa dos umbrales para configurar el NPRACH, que junto con los RSRP permiten calcular las perdidas permitidas para dar una determinada cobertura.

En NBIoT el eNB soporta hasta 3 repeticiones de NPRACH. Desde el momento en el que se consigue el nivel de CE, el UE envia un preambulo especificando el numero de repeticiones para dicho preámbulo, su indice y la potencia objetivo para él. Para el nivel 0, la potencia recibida objetivo de preámbulo (PRTP) será $PRTP - 10 * LOG10\ (número\ de\ repeticion\ dentro\ del\ número\ de\ intentos)$ y para otros niveles será la potencia máxima del UE.

En el NPRACH, el preámbulo de acceso aleatorio se transmite para calcular el tiempo de tramisión del nodo al eNB. Para cada grupo de simbolos del preámbulo se usa salto en frecuencia y se usará

una portadora distinta y tendrá un identificador temporal que le permita verificar la respuesta (RAR), y si no se recibe, se vuelve a retransmitir el preámbulo. Dicha retransmisión dependerá del grado de cobertura y si se supera su número se indica en el RRC.

Al recibir el preámbulo del UE, la red devuelve información relativa al timing (Timing Advance), planificación de recursos radio para envio, identificación temporal del radio de celda (C-RNTI). Tras este mensaje (Msg 2), envia el UE un Msg.3 en el NPUSCH incluyendo su identidad al eNB (C-RNTI MAC CE) que da lugar al proceso de resolución de contenidos, enviando el numero de datos en el buffer. Con todo se permite al eNB una planificación mas eficaz de la potencia y datos del UL.

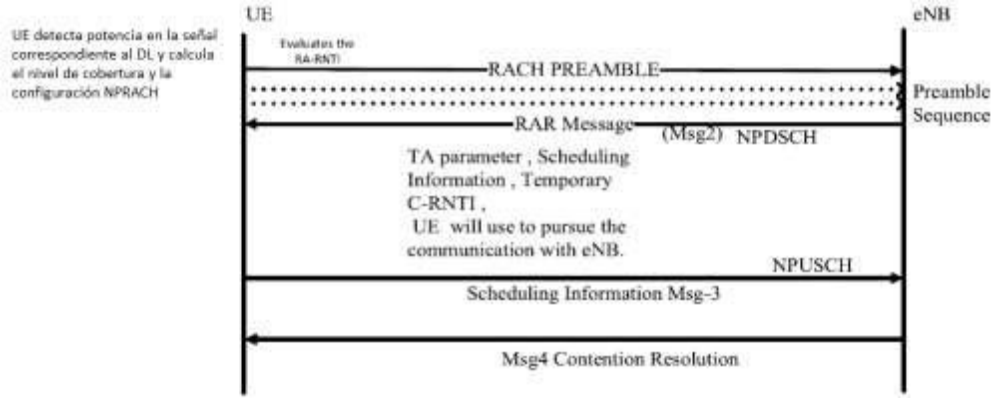


Figura 25 Proceso de Acceso Aleatorio [1]

Establecimiento de conexión

El UE solicita conexión a la red a través de una RRC-Connection-Request, indicando a la par si soporta trafico multi-tono y en varias portadoras.

El eNB contesta a la solicitud con un RRC-Connection-Setup, al que el UE da conformidad y anexa una solicitud de NAS que incluye, a su vez una solicitud de conexión de datos.

Esta capacidad de envio de datos sin conexión PDN es una optimización CIoT, incorporando la conexión PDN al proceso de asociación a la célula. Además, UE y MME (Mobile Management Entity) pueden abandonar una conexión sin necesidad de hacerlo a nivel EPS, permitiendo un elevado numero de conexiones activas de equipos inactivos que tramsitiran los datos de forma casual.

A partir de la conexión se inicia un proceso de autenticación tras el cual se activa la portadora EPS y el resto de pasos necesarios como se ve a continuación:

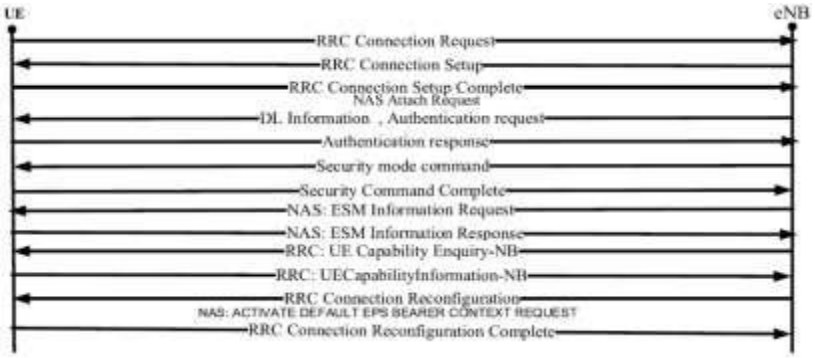


Figura 26 Establecimiento de conexión [1]

Transferencia de datos

Se puede hacer por la optimización del Clot en el plano de control o por el de usuario. En la Rel-13 se añadió la posibilidad de mandar datros en el plano de control y de hecho cuando NB-IoT requiere transmitir pocos datos esporádicamente se usan estas optimizaciones CIoT EPS que incluyen mejoras tanto en ese plano de control como en el usuario:

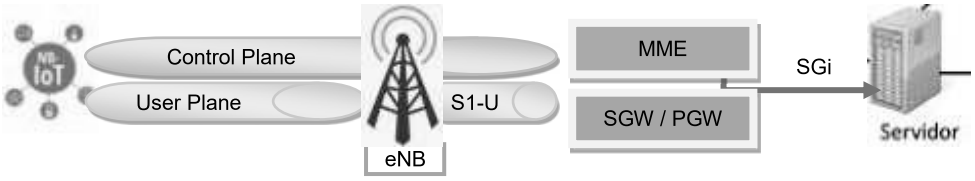


Figura 27 Transferencia de datos

- En el plano de control, el UE envia los paquetes de datos embebidos en NAS acordando con el MME una petición de servicio. Se utizará un mensaje RAI (Release Assistance Information) para acordar con el MME cualquier transmisión tanto en UL como en DL hasta que no sea necesaria mas y se inicia el proceso S1 Release para liberrar recursos. De esta forma el MME puede reducir el periodo de espera DRX para mas transmisiones del UE y se optimiza el consumo de batería. Además si el tamaño de datos por el plano de control resulta excesivo se puede activar una portadora en plano de usuario entre el eNB y el SGW.



Figura 28 Transferencia dedicada por NAS entre eNB y UE [10]

- El plano de usuario de CIoT EPS esta optimizado tanto para transmisiones de datos cortos como largos, aunque requiere la conexión RRC y crear una portadora radio y AS entre la red y el UE mediante procedimiento de control de conexión (p.ej. suspend y resume). Existen dos opciones:
    - Reanudando una liberación de conexión RRC anterior
    - Iniciando una conexión nueva con seguridad y portadora nuevas, es decir:
        1. Establecer nivel de seguridad
        2. Configurar las portadoras (2 max. DRB)

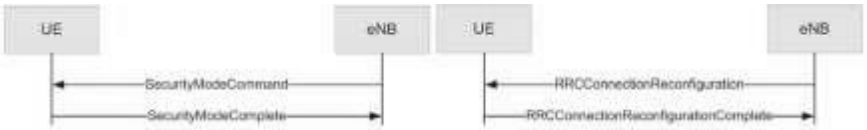


Figura 29 Reestablecmiento de seguridad y conexión RRC [10]

Cabe destacar el uso de multiportadora tanto en UL como en DL si se asigna la llamada portadora de no-anclaje en la reconfiguración. En el DL se elimina la información de sincronización, broadacast y paging y da lugar a mas subtramas para datos. Se usará en el estado RRC_connected y volverá a la portadora de anclaje al volver a RRL_idle.

Igualmente la recepción por el canal de control se puede ver variada en el mensaje de recuperación donde se indica el numero maximo de repeticiones asociadas al USS del UE y que si es menor da lugar a su uso para enviar un NPDCCH diferente a otro UE.

La **transmisión por el UL** de los datos se hace conforme al formato DCI N0 que idica su concesión para la trnsmmsión en NPUSCH. El bloque de transporte puede repetirse varias veces dependiendo de las repeticiones del numero de subprotadoras para una RU, del espaciado de la subportadora y del número de repeticiones. Se transmite durante 256 mseg asignando normalmente varios slot contiguos y se produce unintervalo de 40 ms para evitar recibir simultaneamente en el DL y evitar perder la sincronización.

La **transmisión por el DL** estará indicada por DCI N1 que dará las coordenadas necesarias para el uso del NPDSCH de forma muy similar el UL, pero sin agrupar slots, sino asignandolos consecutivamente en slots y enviandolos en subtramas NPDSCH.

Liberación y cese de conexión

Cuando el eNB libera la conexión puede suspender el UE, pasando éste al estado RRC_idle y almacenando el AS actual, desde el que

puede reanudar mas tarde el estado RRC_connected con las frecuencias y seguridad actualizadas. Este sería el caso de uso de transferencia de pequeños paquetes de datos poco frecuentes, evitando la desconexión total y reconexión que se menciona mas arriba.

La reconexión puede requerir, no obstante, una reconfiguración del RRC a juicio del eNB rechazando una reconexión y controlando así el tráfico de los UE bajo su zona de influencia.

Por último se da el proceso de cese de la conexión, que lo inicia siempre en eNB, tras el cual entraría el UE en un estado RRC_idle.

3.1.11 Mas detalles sobre otras características NB-IoT

Vista hasta ahora una síntesis de los procedimientos principales en el intercambio de ínformación entre el equipo de usuario y la red cabría señalar otros aspectos tales como

Pilas de protocolos

Todo lo visto hasta ahora se puede ver desde la perspectiva de las pilas de protocolos implementadas y en las que residen las distintas funcionalidades, resultando especialmente de interes la siguiente figura:

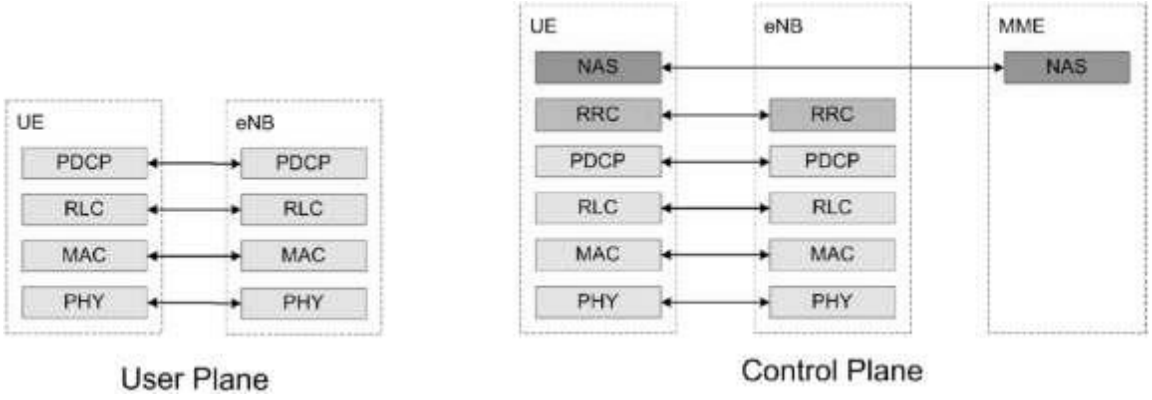


Figura 30 Pilas de protocolos para NB-IoT [14]

En estos protocolos se refleja la optimización de LTE para NB-IoT, como un nuevo interfaz y con elementos nuevos como puede ser la portadora de señalización SRB1bis en el plano de control, o en el plano de usuario hasta que se activa la seguridad.

La información del sistema

Tal y como se ha expresado en la descripción del NPDSCH, se definen bloques de información general para todos los UE de una celda, tal y como indica la siguiente tabla:

SIB	Contenido
MIB-NB	Información esencial para recibir mas datos
SIB1-NB	SIB Scheduling para aceso y selección de celda
SIB2-NB	Información configuración recurso radio
SIB3-NB	Información reselección de celda
SIB4-NB	Información celda vecina para reselección de celda intrafrecuencia
SIB5-NB	Idem interfrecuencia
SIB14-NB	Parámetros restricción de acceso
SIB15-NB	Información hora GPS y UTC

Tabla 4 Tipos de SIB e información que incorporan.

Scheduling

La planificación de los recursos asociados a cada comunicación se envía con mensajes SI que agrupan SIB (tamaño max. 680 bits) y que usan el canal descendente par su distribución en distintas ventanas SI.

Notificación de cambio

Estas notificaciones son las que se llevan a efecto en caso de un cambio en el sistema. Se indican dentro del periodo de modificación con un mensaje paging, salvo excepciones como la restrcción de acceso (AB) con un SIB14-NB o una acción derivada de un SIB15-NB (temporización).

Ademas de usar paging se puede usar la etiqueta correspondiente en la MIB.

3.2 Estudio de LoRa

3.2.1 Descripción general

LoRa (Long Range) es una técnica de modulación orientada a IoT que permite la transferencia de información con baja tasa de transferencia en zonas de cobertura amplias.

Esta tecnología ha sido patentada por Semtech Corporation, y se trata de un tipo de modulación de espectro ensanchado (Spread Spectrum) que utiliza una señal chirp que varía con la frecuencia (CSS) y que simplifica la complejidad del receptor. Utiliza hasta 6 factores de ensanchado.

Esta orientada a comunicaciones M2M con tasas de hasta 50 kbps y señales de hasta 25 dB por debajo del nivel de ruido. Dispone de un esquema adaptativo de velocidad de datos (ADR) para optimizar el uso de la batería.

LoRa puede trabajar en varios rangos de frecuencia en la banda ISM según la región del mundo: Europa 863-870 Mhz (en 8 canales elegidos arbitrariamente de 0.3 Mhz), EEUU y Canadá 902-928 Mhz (13 canales de 2.16 Mhz). Estas frecuencias y la técnica de modulación le permite a esta tecnología crear grandes áreas de cobertura con pocos recursos.

Utiliza 6 factores de ensanchado (Spreading Factor SP7-SP12) que determinan la cantidad de datos redundantes en transmisión y, por ende, en el alcance y la velocidad. A mayor SF, mayor alcance pero menor velocidad.

Con esta modulación LoRa, se genera LoRaWAN (protocolo MAC y arquitectura del sistema) para un red de área extendida de baja potencia LPWAN para dispositivos con comunicación bidireccional de bajo coste y consumo.

3.2.2 Red Lorawan

Normalmente las redes LoRaWAN son estrella de estrellas donde hay unos nodos que hacen función de gateways entre otros nodos y un servidor de red. La conexión Gateway-servidor se hace IP y entre nodos se hace con enlaces LoRa o FSK a nivel físico en modo uni- o bidireccional.

Los nodos no están asociados a un gateway específico y será el servidor de red el que filtrará los paquetes duplicados, verificará la seguridad, dará acuse de recibo y reenviará la información al servidor de aplicación que corresponda. Asimismo verificará la calidad de la información recibida por varios gateways, haciendo innecesario proceso de hand-over alguno.

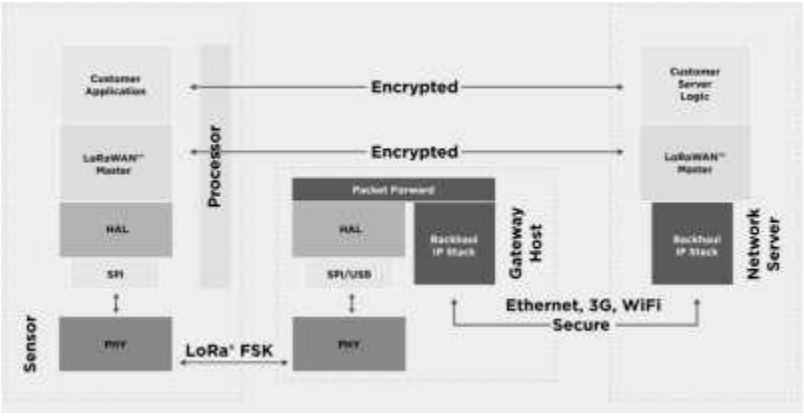


Figura 31 Arquitectura de red LoRaWAN [7]

Los dispositivos pueden operar en modo P2P o en modo híbrido y disponen de dos métodos para pasar a formar parte de una red según se conozcan las claves de cifrado (Activation by

Personalization ABP) o se negocien en el momento de la activación (OTAA Over-the-Air Activation)

Los dispositivos de una red pueden ser de tres clases conforme a la compensación entre la latencia de comunicación del downlink y la bateria: A, B o C, siendo la A la mínima y pudiendo incluir B o C

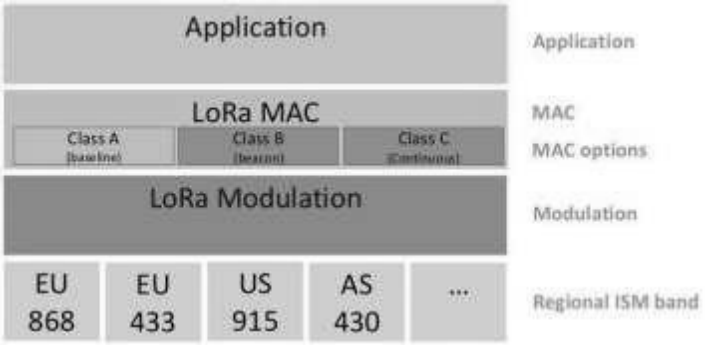


Figura 32 Clases de dispositivos LoRaWAN

Las diferencias serían:

- Los clase A son los de menor consumo y el proceso sería: envio de mensaje ascendente, apertura de 2 ventanas de recepción de respuesta con 2 retardos distintos.
- Los clase B abren ventanas de recepción en tiempos programados a partir de una señal baliza que envía el Gateway
- Los clase C son los de menor latencia abriendo una ventana continua de recepción hasta el final de la transmisión, a costa del consumo de energía.

3.3 Estudio de SigFox

3.3.1 Descripción general

SigFox es una tecnología propietaria de la empresa francesa del mismo nombre que se identifica como operador de LPWAN para conectividad IoT.

Se trabaja en banda no licenciada (ISM Band), en 868MHz en Europa, 915MHz en EEUU y 433MHz en Asia, con modulación BPSK en un ancho de banda ultra estrecho de 100 Hz a 600 bps máximo.

La transmisión downlink va siempre a continuación de una uplink, la cual esta limitada a 140 mensajes diarios, cada uno de los cuales tiene una carga útil máxima de 12 bytes. Para el downlink es limite es de 4 mensajes de 8 bytes, por lo que no permite acuse de recibo para todos los mensajes.

La falta de acuse de recibo se palia, asegurando las comunicaciones con la diversidad en tiempo-frecuencia (Random Frecuency and Time Division Multiple Access RFTDMA) y duplicando la transmisión, que se repite tres veces por canales distintos y en base a la cual las estaciones base pueden recibir varias a la vez.

La potencia máxima es de 14 dBm, lo que permite celdas de hasta 40 km en áreas no urbanas mediante el despliegue de estaciones base con radio cognitiva definida por SW que resultan ser muy sensibles (a 100 bps -142 dBm y a -134 dBm 600 bps)

3.3.2 Red SigFox

La topología que se usa es en estrella, con un desempeño bastante simple por jerarquía similar a LoRaWan. Los dispositivos se conectan a las estaciones (denominadas Base Stations) que aúnan la información y la hacen llegar a la nube SigFox a través de enlaces de distintas tecnologías.

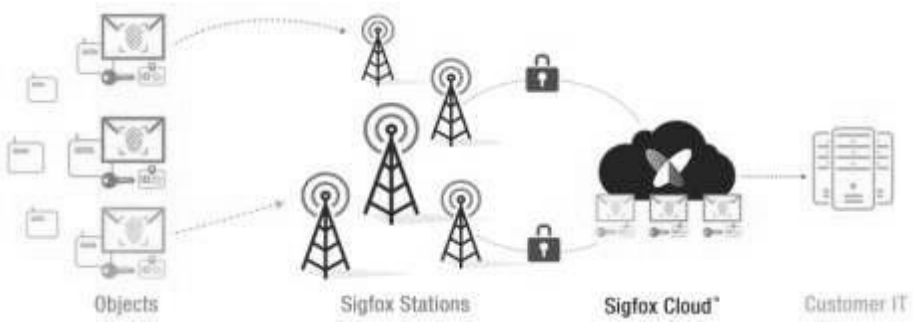


Figura 33 Arquitectura SigFox [8]

En esta arquitectura se monta una pila de protocolos para implementar las distintas funcionalidades:

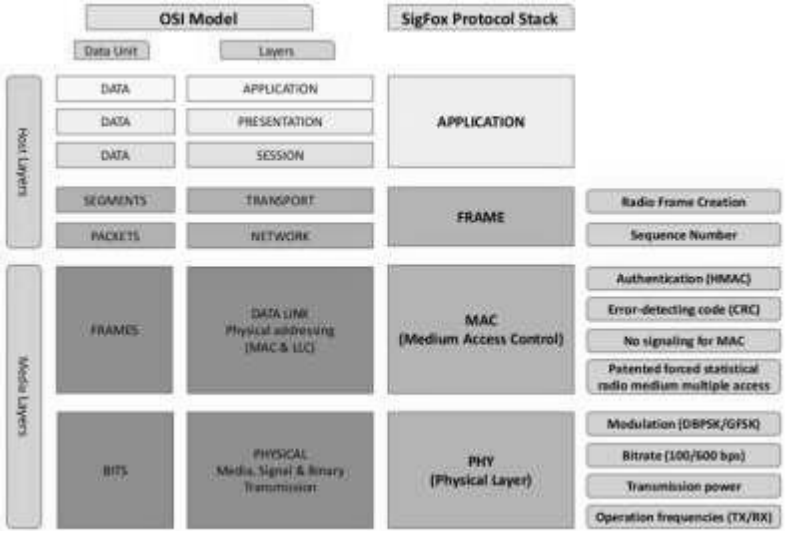


Figura 34 Pila de protocolos SigFox

Entre dichas funcionalidades están,

- la generación de tramas (nivel 3) radio a partir del nivel de aplicación, adaptando los datos a ese nivel.
- el ensamblado de los datos en el nivel MAC cuyo formato incluye un preámbulo para sincronización un *frame sync* para identifica el tipo de trama, un *end device ID* para identificar el dispositivo, los *datos* en sí y campos de *autenticación* y chequeo de secuencia y detección de errores *FCS*

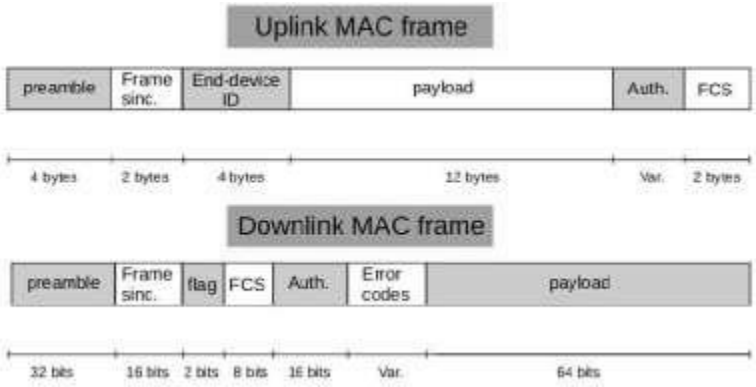


Figura 35 Trama SigFox

- en el nivel físico se lleva a cabo la protección contra interferencia y escucha activa de paquetes con envíos repetidos y aleatorios, mecanismos de seguridad propios como NAK, con el que se asigna una clave por dispositivo en su y que permite su acceso a red, una vez validado desde ella; mensajes de autenticación con código para implementar autenticación e integridad;etc.

A modo de ejemplo se puede ver como es la comunicación en el downlink para actuar sobre un dispositivo desde la red

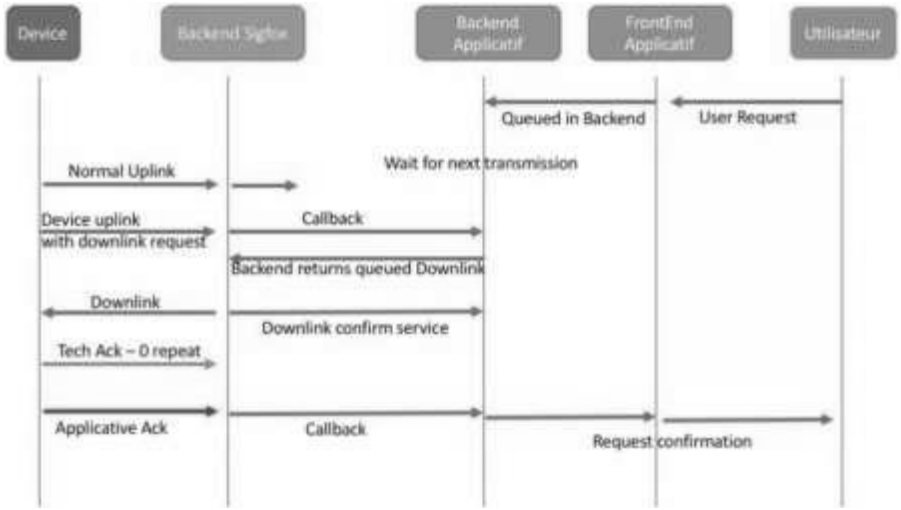


Figura 36 Señalización y mensajes downlink SigFox

Para empezar la comunicación el backend de la red SigFox almacenará el mensaje hasta el periodo de actividad (recepción) que el dispositivo tenga para optimizar el uso de la batería. Esta transmisión se dará cuando se confirme por uplink la solicitud de downlink (ack flag), tras la cual el dispositivo estará 30 segundos con la recepción activa.

En el periodo de escucha la red SigFox entra en contacto con los servidores de aplicación (callback to applicative backend) y se reenvia el mensaje al dispositivo por la estación mas adecuada, indicándose esta transmisión con el mensaje correspondiente

La calidad de la recepción dependerá de múltiples factores y la red SigFox confirmará la recepción con un mensaje fuera de banda, OOB, que es una confirmación que incluye el RSSI, entre otros datos relativos a indicador de calidad del enlace (Received Signal Strength Indicator (RSSI) Número de estaciones que recibieron el mensaje (receiver redundancy) y la zona del mundo donde esta la red (RC)).

La existencia de los distintos métodos de acuse de recibo, seguimiento de secuencia, reducción de colisiones, etc. convierten a SigFox en una red con una QoS elevada, gran escalabilidad y flexibilidad.

3.4 Características IoT y comparativa entre tecnologías LPWAN

Cada tecnología surge a partir de una necesidad o un nicho de mercado que al que ha dado lugar una evolución tecnológica y que pretende generar una necesidad.

Los parámetros que distinguen las tecnologías van a venir dados por las necesidades que cubren.

Las tecnologías LPWAN lo primero que las caracteriza son su radio de acción. Mientras otras tecnologías están en torno a metros (<100m normalmente) y se dedican a cubrir necesidades de redes locales y con dispositivos que no se mueven, las redes LPWAN van orientadas a redes celulares con un radio de acción por celda de varios kilómetros o una red de celdas que permita elementos móviles.

Nos centraremos en las redes LPWAN, de las cuales podemos hablar de parámetros que nos van a interesar más o menos en función de cómo luego los usemos para caracterizar el tráfico.

Definir los parámetros comparativos entre las tecnologías permitirá definir cuándo, dónde, cómo y por qué usar una u otra. Lo que denominan casos de uso. Las características más importantes de los casos de uso de IoT son:

- La tasa de datos
- La latencia
- La cobertura
- La duración de la batería
- La complejidad del dispositivo
- La capacidad de equipos por celda
- Escalabilidad y tamaño de carga útil
- Modelo de despliegue
- Coste
- La calidad del servicio QoS

Se pueden encontrar tablas comparativas de gran detalle en [**1**] , aunque podemos extraer las principales características generales. Por un lado las vinculadas a la parte radio y por otro las de tasa de datos enviados, mas vinculadas a tráfico.

Así podríamos destacar los siguientes parámetros radio de las distintas tecnologías LPWAN

Parámetro	LoRa	SigFox	NB-IoT
Coste UE	Bajo		
Esquema modulación	FSK	GFSK/DBPSK	BPSK, QPSK
Batería	De larga duración (años)		
Ancho de banda (canal)	125 kHz	100 Hz	180 kHz
Banda de trabajo Mhz	868/915	915/928	700,800,900
Movilidad permitida de UE	Si	Si	Nomadic
Ventajas	Inmune a interferencias	Optimiza frecuencia aleatoria para tx canal	Mejor cobertura
Inconvenientes	Latencia alta	Sin FEC. Interferencia	Sin handoff, baja inmunidad al ruido

Tabla 5 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspecto Radio

Y características vinculadas al tráfico que generan o que son teóricamente capaces de gestionar.

Parámetro	LoRa	SigFox	NB-IoT
Tasa de transmisión (kbps)	50	0.1	200
Latencia (ms)	1-10	1-30	<10.000

Throughput (Kbps)	50	0.1	150
Requisitos	Gateway	SigFox modem y Network	SW upgrading and SIM
Longitud máxima carga	Sin limite	140 mensajes (1680 bytes) al día vía UL	Sin limite
Ventajas	Tasa adaptativa	Alta fiabilidad	PSM eDRX
Inconvenientes	Tamaño máximo de paquete Sin reconocimiento de todos los paquetes	Poca seguridad	Perdidas acuse de recibo
Número de elementos por celda	<20000	<20000	<50.000

Tabla 6 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspecto Tráfico

De entre estos parámetros se puede concluir que dependiendo del tipo de datos que queramos transmitir o del entorno mas o menos ruidoso en el que nos encontremos hay una tecnología mas conveniente que otra.

En relación a los modelos de tráfico en los que se contemplan lo flujos de información que se van a generar y como la red los va a gestionar, hay una fuerte dependencia entre el número de equipos que son capaces de incorporar a una celda (NB-IoT tiene hasta 50.000 equipos por celda) y los datos que se generan (Lora tiene un tamaño máximo de paquete, un número máximo de bytes por dia o una latencia característica)

3.5 Modelos de tráfico en redes de telecomunicaciones

El modelado de tráfico en redes IoT es tema pendiente de desarrollo específico para LPWAN, y mas para NB-IoT, no habiendo encontrado nada en este particular dentro de la extensa documentación existente. Este punto resulta de especial valor en el estado del arte y la aportación que pretende dar este Trabajo. El objetivo es generar un documento en el que se aúne la parte teórica básica de los modelos de tráfico, los estudios realizados y concretamente todo lo relativo a LPWAN y NB-IoT en especial.

3.5.1 Introducción a los modelos de tráfico.

La teoría de tráfico consiste en la aplicación de modelos matemáticos para explicar la relación entre la capacidad de una red de comunicaciones, la demanda de servicio que generan sus usuarios y el nivel de desempeño que puede alcanzar.

Como la demanda tiene naturaleza estadística, se representa por un proceso estocástico adecuado y se constituyen los diferentes Modelos de Tráfico. Con estos modelos de tráfico se puede imponer a una red unas condiciones y predecir su comportamiento con las herramientas matemáticas y estadísticas adecuadas.

El ejemplo clásico es el de redes telefónicas, que relacionan el trafico y el desempeño de la red con una fórmula Erlang-B para calcular la probabilidad de que se rechace una llamada *Pb* si hay N circuitos que dan servicio a usuarios con intensidad de tráfico p (tasa de llegada de llamadas por duración promedio de llamada). Para esto se supone un modelado para la llegada de llamadas de un proceso estacionario de Poisson.

En toda red esto cálculos son necesarios para estimar las garantías que se pueden ofrecer, de manera que el modelado tiene como objetivo evaluar la calidad de servicio QoS ofrecida partiendo de una carga impuesta y viendo su impacto.

La evolución en las telecomunicaciones a redes convergentes basadas en compartición de recursos y uso de un protocolo, que es IP, para multitud de servicios, incluida la voz sugiere nuevos patrones de tráfico a modelar con QoS variada. Algo muy distinto a las redes telefónicas.

Se requiere una caracterización de las fuentes de datos de una conexión y una evaluación del comportamiento agregado de esas fuentes para dar lugar a un modelado de tráfico. Se pueden usar modelos matemáticos (descripción analítica del tráfico), de simulación (mas flexible por poder usar datos reales o estadísticos en entornos que necesitan capacidad de calculo) o físicos (en sistemas reales).

Para redes convergentes con servicios de un elevado número de fuentes heterogéneas resulta complejo el análisis analítico y es mas efectivo definir arquitecturas tipo para realizar pruebas y evaluación de prestaciones. Se deben caracterizar analíticamente para ello las fuentes de tráfico de uso común y los parámetros de calidad y disponibilidad para garantizar la calidad de servicio y las prestaciones de la red.

3.5.2 Modelo de red

La red se modela partiendo de un modelo de red orientado a servicios, transporte extremo a extremo y calidad de servicio para redes LPWAN.

La arquitectura tipo para redes LPWAN podría ser la de cualquier tecnología de las vistas hasta ahora, como puede ser la de LoRa:

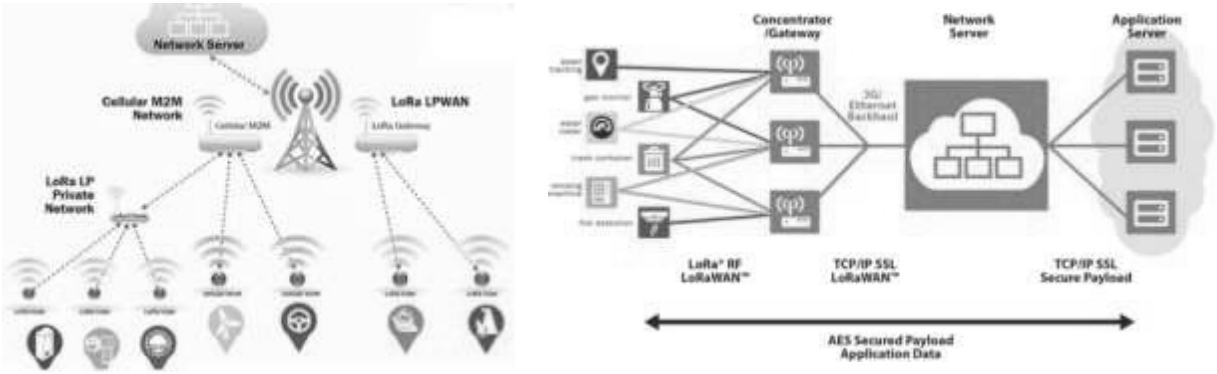


Figura 37 Arquitectura general LPWAN a partir de LoRa [8]

Dependiendo de la tecnología nos permitirá mas o menos usuarios o requerirá de mas o menos elementos (gateways, etc.). Grosso modo para llevar a cabo un estudio se definirán escenarios que permitan dar el mismo servicio para los mismos elementos con las tres tecnologías y se compararán los resultados.

Se tendrán dispositivos UE IoT generando datos hacia una plataforma de servicios de valor añadido directamente conectada a la red de comunicaciones.

3.5.2.1 Definición de usuarios de red para el modelo

Los usuarios de la red serían dispositivos LPWAN asociados a cada tecnología, que fijarán sus características. Estos dispositivos serán as fuentes de datos que terminan convergiendo en una red troncal que debe ser capaz de gestionar el tráfico y darle salida conforme a normas de la red de telecomunicaciones para poder implementar servicios de valor añadido.

3.5.3 Definición de tráfico de datos: modelos y fuentes

El rendimiento de una red en particular estará condicionado por la naturaleza y volumen del tráfico que se maneje. Este tráfico, con un comportamiento característico basado en la periodicidad y su esencia orientada a evento, se describe mediante variables aleatorias que modelan la llegada de bloques o paquetes de datos y su tiempo en el sistema, que definirá su tiempo de ocupación y disponibilidad.

El trafico se suele clasificar por el servicio al que están asociadas y sus características en la transferencia de información y calidad.

Así por ejemplo, tendremos diferentes tipos de tráfico atendiendo a:

CRITERIO	TIPOS
CARÁCTER. FLUJO DE INFORMACIÓN	Real Time, en aplicaciones críticas donde se garantice retardo mínimo y ancho de banda suficiente.
	Store and Forward y Best Effort, en aplicaciones ni criticas ni de retardo ni ancho de banda mínimo exigido, aunque susceptibles a las pérdidas.
	Tasa de bit constante o variable, garantizada o no
	Unidireccional, bidireccional, punto a punto o multipunto, etc.
CALIDAD	Máximo retardo, como el tiempo máximo que se tarda en llevar la información entre dos puntos
	Jitter o variación del retardo.
	Tasa de error
	Tasa binaria

Tabla 7 Tipos generales de tráfico de datos

Para llegar a modelar un flujo de datos procederemos a definir cómo caracterizarlo (fundamentos matemáticos y formulación) y con qué (parámetros que usaremos).

Los modelos de tráfico nos permitirán recrear trafico sobre una red y optimizar su uso. Uno de esos modelos es el On/Off el cual describe un comportamiento del tráfico agregado por una o más fuentes de información muy ligado, aunque de complejidad variable, a IoT.

3.5.3.1 Formulación

Del tratamiento matemático obtendremos las conclusiones, pero para ello hará falta formular una serie de aspectos propios de la red y su tecnología.

Caracterizaremos un tráfico por parámetros como:

- Intensidad de tráfico.- número de recursos ocupados en un instante de tiempo. Su varianza y valor medio se calculan sobre un periodo T.
- Tasa media de llegadas (λ).- número medio de paquetes o bloques de datos recibidos en un tiempo predefinido. Su inverso sería el tiempo medio entre llegadas (1/λ).
- Tiempo de servicio (d).- tiempo medio en el que un recurso esta ocupado, aunque se puede usar su inversa (μ)

Así el tráfico será la relación entre los anteriores:

$$Tráfico = \frac{tasa\ media\ de\ llegadas}{tiempo\ de\ servicio} \rightarrow A = \lambda d = \frac{\lambda}{\mu}$$

y se puede pensar en A como una variable aleatoria que modela el tiempo entre llegadas, modelar dicha variable aleatoria como una distribución exponencial y se puede empezar a abordar el análisis estadístico de las fuentes de datos y el tráfico de red.

3.5.3.2 Clasificación de los modelos de tráfico

Una primera división entre los modelos de tráfico partiendo de [3] podría ser estacionarios y no estacionarios, estando entre los estacionarios el modelo de fuentes simples On/Off (Packet Train Source Model) en el rango corto, pero si se realiza un proceso de multiplexación estadística de este tipo de fuentes pasa a ser un proceso con dependencia de rango largo. Conforme a [44], la dependencia de rango corto o largo según sea una fuente sencilla o una multiplexación estadística tiene una relación directa con la correlación de la señal a través del tiempo. Por lo tanto la correlación y su coeficiente, la covarianza, y el parámetro de Hurst regularán la aplicación de un modelo y otro según las fuentes.

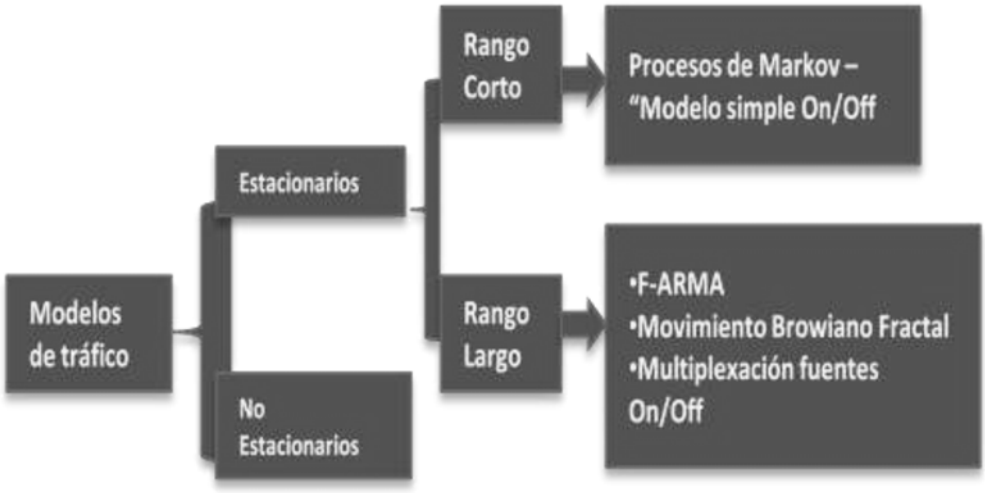


Figura 38 Clasificación general modelos de tráfico

De forma genérica se puede dividir el tráfico en dos grandes grupos

- Trafico de Poisson, o de fuentes sencillas On/Off tal y como se ha indicado mas arriba, estaba pensado para redes de conmutación de circuitos, llamadas de voz y observación a largo plazo. Se caracteriza el proceso estocástico por la estacionalidad, la independencia entre instantes de tiempo y la regularidad. El número de llegadas (N) en un tiempo determinado (T) de este tipo de tráfico tienen una distribución de Poisson. Este modelo ha sido complementado con el concepto de estados de las cadenas de Markov, dando lugar al Proceso de Poisson Modulado por Markov (*MMPP Markov Modulated Poisson Process*) en el que se combina el agregado de procesos estadísticamente independientes de

Poisson (ver abajo Teorema de Palm). No obstante estos procesos, al ser dependientes de rango corto, no se ajustan al comportamiento real del tráfico por lo que se calculó la autocorrelación entre los datos generados, verificando un valor elevado de la misma.

- Trafico autosimilar, para redes de tráfico de datos (internet, video, etc.) donde:
    - no se cumple que los tiempos entre eventos sean independientes entre si,
    - ni que la duración del evento sea independiente de las demás
    - el efecto de correlación se alarga en el tiempo

  La técnica de modelado de fuentes On/Off hace posible otro enfoque que hace posible esa multiplexación de varias fuentes que describen procesos On/Off con distribuciones de probabilidad variables, basada en el comportamiento de una variable aleatoria que tiene una distribución de cola pesada. Si la duración en cada uno de los estados del modelo On/Off es exponencial y se mantiene como independiente e idénticamente distribuido con un comportamiento de cola pesada, se podría modelar el trafico con dependencia de rango largo y pensar en el trafico de datos de redes de datos como Internet o IoT.

  En estas redes se usan modelos de trafico fractal o autosimilar (autocorrelación y dependencia de rango largo) donde la función de distribución para el original y los procesos agregados son iguales (posible modelado como *Movimiento Browniano Fractal* que presenta una varianza y un parámetro de Hurst característicos). El proceso agregado de llegada es la media del proceso original en bloques de tamaño *m*, aunque con diferentes escalas de tiempo. Se puede abstraer el trafico es una serie de tiempo y representarse en relación a este parámetro: el tiempo. Así se puede hacer una predicción del comportamiento.

  La característica mas importante de estos procesos es el parámetro de Hurst, que permite generar flujo autosimilar de determinado perfil. Valores pequeños del parámetro de Hurst se acercan al proceso de Poisson (varianza=valor medio). Valores altos indican gran dependencia entre paquetes. Aparece el concepto por lo tanto de ***tráfico agregado*** y su relación con un proceso de Poisson.

Para seguir trabajando con el tráfico, y su formulación como un proceso de Poisson, o no , de trafico agregado, etc. son necesarios algunos fundamentos matemáticos, que se exponen a continuación.

Fundamentos y aproximaciones matemáticas

Continuando con el punto anterior, conforme a [9] y [30] el supuesto de que un número elevado de dispositivos funcionando conjuntamente puede ser modelado como un proceso de Poisson se trata a partir de los siguientes parámetros y estimaciones o aproximaciones:

- Teorema de Palm-Khintchine → Este teorema muestra que la superposición de un número elevado de procesos que se reinician independientemente tienen propiedades Poissonianas y se puede describir mediante un proceso de Poisson:
  - Sean los procesos renovables independientes $\{N_i(t), t \geq 0\}\, para\ i = 1,2, \dots n$ cuya llegada entre ellos se hace con un tiempo intermedio T_i identificados con iid. Su superposición $N(t) = \sum_{i=1}^{n} N_i(t)\,, t \geq 0$ cuando n→∞ es un proceso de Poisson, siempre que la carga general sea finita $\left(k = {}^{n}/_{\sum_{i=1}^{n} E[T_i]}\right)$ y no haya ningún proceso que domine la superposición $\left(E[T_i] \ll {}^{1}/_{k}\right)$
  - Este teorema se basa en el supuesto de que hay un número elevado de procesos estocásticos a pequeño nivel, y no hay ninguno que domine el proceso agregado
- Aproximación a Poisson para los datos periódicos generados en IoT → El teorema visto mas arriba conduce a definir el proceso de trafico periódico agregado como una superposición de *n* procesos independientes en el mismo periodo de tiempo. Para ello se parte de :
  - Trafico IoT Periódico. Sea *i* un nodo fuente de tráfico que genera un mensaje periódicamente $(\text{cada } \mathrm{t_i} = \mathrm{kT_i}\ \text{para}\ \mathrm{k} \in \mathbb{N}\ \text{y periodo}\ \mathrm{T_i})$. Este tráfico se puede agregar y dar lugar a las siguientes situaciones dependiendo si son
    - fuentes síncronas ($\mathrm{t_i} = \mathrm{t}\ \forall \mathrm{i}$),
    - asíncronas con el mismo periodo ($\mathrm{t_i} \neq \mathrm{t_i}, \mathrm{T_i} = \mathrm{T}$) o
    - asíncronas con periodos distintos $\mathrm{t_i} \neq \mathrm{t_i}, \mathrm{T_i} \neq \mathrm{T}$).
  - Trafico asíncrono homogéneo periódico. Sean *n* nodos con los mismos periodos para transmisión de mensajes T. Si son asíncronos comienzan a transmitir aleatoriamente en $\mathrm{t_i} \sim \mathrm{U}(0, \mathrm{T})$ y periódicamente transmiten un mensaje $\text{cada } \mathrm{t_i} + \mathrm{kT}\ \text{para}\ \mathrm{k} = 0,1,2 \dots$ y tendrán un tiempo entre mensajes de distintos nodos (nodo i y nodo i+1) que llamamos $\mathrm{A_i} = \mathrm{t_{i+1}} - \mathrm{t_i} \neq \mathrm{T}\ \mathrm{i} = 1, \dots \mathrm{n} - 1)$ con $\mathrm{t_0} = 0$ y $\mathrm{A_n} = \mathrm{T} + \mathrm{t_1} - \mathrm{t_n}$ que es el tiempo entre el primer mensaje de una ventana y el ultimo de la ventana anterior

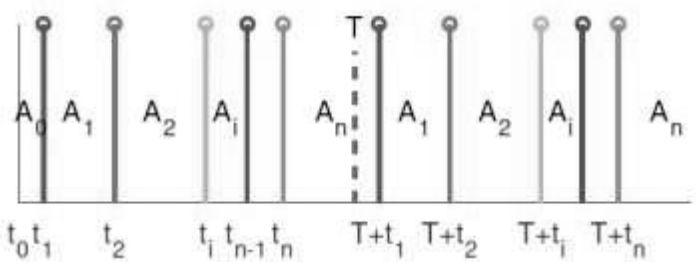


Figura 39 Sistema de periodo T con n nodos asíncronos[30]

- Medidas de rendimiento o desempeño → La primera cuestión es cómo de grande tiene que el numero de dispositivos para que el trafico agregado (*Agregatter Periodic Traffic Proccess APP*) se pueda modelar como un proceso de Poisson y cual es error introducido. Para dar respuesta a estas preguntas se plantean varias parámetros a medir:
    - Datos IoT asíncrono con el mismo periodo:
        - Tiempo entre llegadas (entre envío de datos)
        - Error relativo del tiempo entre llegadas esperado
        - Desplazamiento entre trafico esperado.
        - Varianza del trafico periódico
        - Desviación del numero de llegadas esperadas.

    y valores ideales para una modelización que se ajuste a la realidad:

    - Que la tasa de APP (n/T) y del proceso de Poisson (λ) sean iguales
    - Que se aproximen a cero:
        - el error relativo entre la media de tiempo entre llegadas en el trafico APP y el del proceso de Poisson.
        - la diferencia entre los tiempo de llegada el APP y de Poisson
        - la variación entre los tiempo de entre llegadas para APP y proceso de Poisson
    - Que el número de llegadas en T se aproxime a n

    Con todo lo anterior se fijaría un escenario donde medir dichos parámetros y poder comparar. Este escenario, tal y como lo describe [**30**], normalmente es un nodo concentrador del trafico de n nodos y se convierte en una cola nD/D/1 conforme a la notación Kendall [**12**]:

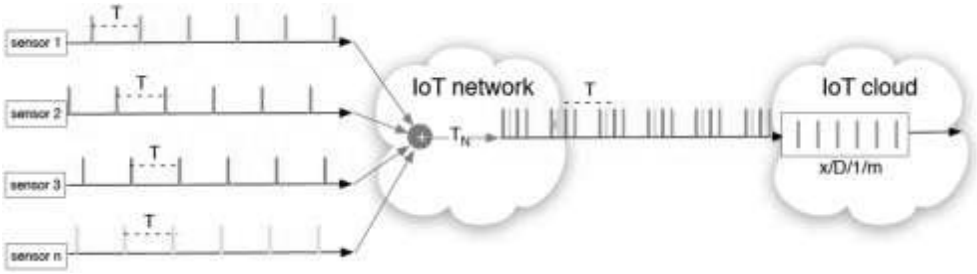


Figura 40 Escenario de pruebas [30]

y se valoran los comportamientos de dicho escenario con una distribución M/D/1, un nD/D/1, viendo el error relativo y tiempo medio de espera.

3.5.3.3 Parámetros para fuentes de tráfico y tráfico generado

Los parámetros con los que caracterizaremos el tráfico en una determinada red de telecomunicaciones serán básicamente:

- El número de dispositivos (fijo, variable, móvil, etc.)
- El Proceso de llegada
- El intervalo de medida
- El tamaño del bloque de datos que genera el dispositivo final

Con estos parámetros básicos se constituirán los escenarios de uso de estas tecnologías. La caracterización del modelo de datos final debe permitir incorporar los distintos dispositivos y comportamientos de redes LPWAN.

Cada uno de los parámetros de dichos aspectos se pueden materializar como variables aleatorias con una distribución específica. Así, para cada fuente:

- se puede pensar en momentos de incorporación al sistema o sesiones, con un número de bloques de datos que se envían en ráfagas separadas por intervalos de envío:

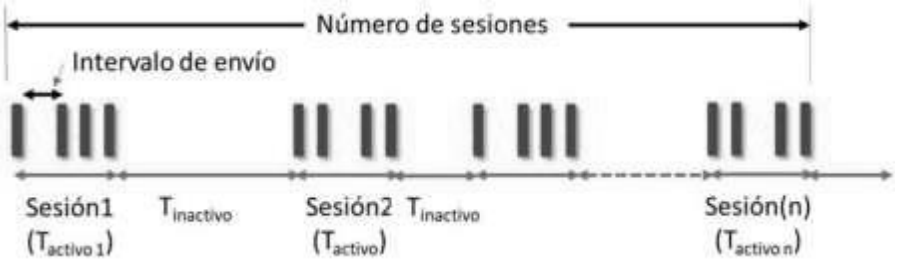


Figura 41 Modelado del tráfico de una fuente LPWAN [28]

- Una vez caracterizado cómo se van a enviar los datos se deben definir los datos en sí con parámetros en línea con las

características de la tecnología de la red que sea (en este trabajo serían redes LPWAN: LoRa, SigFox y NB-IoT) :

Parámetro	Tipo	Descripción	
Bloque de datos	Tamaño del bloque de datos	En bytes.	Variable aleatoria de distribución exponencial acotada (media, min y max.)
	Datos eficaces	en bytes de información real	
	Tamaño bytes de tecnología	Preámbulos, sincronizaciones, etc	
Ráfagas	Número de bloques por sesión	Número entero	Variable aleatoria de distribución uniforme
	Numero de sesiones		
	Tiempo entre envio de datos	En unidades de tiempo	Variable aleatoria de distribución exponencial acotada (media, min y max)
	Tiempo inactividad		

Tabla 8 Parámetros de caracterización de datos en un modelo de tráfico

3.5.4 Fuentes de trafico LPWAN

Una vez vistos los parámetros a considerar, veamos cómo se caracterizan y porque las fuentes de tráfico en LPWANs y cómo se llega a los modelos de tráfico.

Las comunicaciones que se van a dar en redes LPWAN serán M2M (Machine to Machine), entre máquinas que no precisan de intervención humana. El número de dispositivos será determinante, así como sus requerimientos específicos que serán críticos en el impacto en aspectos de las distintas arquitecturas de red tales como la señalización, clases de servicio, capacidad de dispositivos por celda, etc.

Como características generales de las fuentes de redes LPWAN y del trafico [**11**] podríamos hablar de:

- Gran numero de dispositivos
- Patrones de trafico con ciclo de trabajo bajo
- Cantidad de paquetes baja y de pequeño tamaño dichos paquetes
- Patrón de trafico con pequeñas variaciones
- Trafico asimétrico uplink/downlink
- Dispositivos con trafico de múltiples fuentes (paquetes agregados)
- Tráfico de los dispositivos puede estar coordinado por requerimientos de la aplicación

La característica diferenciadora del tráfico M2M es su homogeneidad donde miles de dispositivos muestrean el entorno a una tasa determinada más o menos uniforme y generan un volumen de datos más o menos constante de fuentes que pueden coordinarse.

3.5.4.1 Aplicaciones y requisitos de servicio de redes M2M

Los modelos, las fuentes y el tráfico en definitiva se debe a necesidades existentes cubiertas por tecnologías LPWAN. Estas necesidades se ha llegado a tipificar y de hecho 3GPP ha clasificado 7 posibles escenarios de aplicación donde las redes LPWAN va a desarrollarse: seguridad, monitorización y seguimiento, pagos, salud, control y mantenimiento remoto, medición y dispositivos de consumo.

Para estas aplicaciones 3GPP ha establecido posibles características de la comunicación:

- Movilidad reducida, para dispositivos de escasa movilidad
- Tiempo real (controlado), donde los momentos de transmisión están establecidos y la señalización se puede reducir o incluso eliminar.
- Tiempo no real, donde la solicitud de conexión se puede rechazar y hacerse en momentos de bajo tráfico
- Baja transmisión de datos, y no solo de datos, sino también de señalización.
- Móvil terminado infrecuente (MT), donde la gestión de movilidad no sea necesaria
- Monitorización MTC, conforme a perdidas de conectividad o errores en el dispositivo.
- Conexión segura, entre las maquinas (dispositivos y servidores de red)
- Características MTC basadas en grupo, en función de políticas de control, direccionamiento, etc.

A partir de estos parámetros se pueden establecer fuentes de un tipo o de otro, o con perfiles híbridos asociados a un escenario y aplicación.

3.5.4.2 Modelos de tráfico para redes M2M

Según se ha visto mas arriba se dispone de un elevado número de dispositivos con un tráfico que puede ser síncrono o asíncrono, con un periodo de actividad u otro, con unos datos de tamaño variable dentro de un rango, para dar lugar a tiempo real o no, etc. En definitiva, por mucho que se haya acotado el espectro de posibilidades, conviene definir un modelo de tráfico al que someter a una red.

Se presenta el reto de verificar la viabilidad práctica de que un modelo incorpore las características de las fuentes. Para el caso de comunicaciones con dispositivos en redes LPWAN, una aproximación podría considerar la información agregada de todos los dispositivos MTC como un único flujo: modelado por tráfico agregado

Los modelos de trafico agregado parten del supuesto de que los dispositivos son sencillos y numerosos, lo que se ajusta perfectamente a redes LPWAN. Este comportamiento puede ser descrito por un proceso de Poisson en el que la tasa de llegada (λ) puede cambiar con el tiempo (λ(t)) ante una posible sincronización de los dispositivos.

Definición de modelos

3GPP en TR43.868 [**13**] definió tres modelos de tráfico de fuentes agregadas que incluyen el acceso a la red de manera descoordinada o sincronizada:

Modelo de tráfico	Descripción Dispositivos MTC que acceden a la red de una manera
T1	descoordinada / no sincronizada
T2	coordinada/ sincronizada con una cierta distribución
T3	descoordinada / no sincronizada

Tabla 9 Modelos de tráfico [**13**]

Sus principales características son:

Parámetro	Escenario T1	T2	T3
Numero de dispositivos	λ/intervalo_de_ medida	X	λ/intervalo_de_medida
Proceso de llegada	Poisson Intensidad de llegada: λ(llegadas por seg)	Distribución de eventos deterministicas de tiempo limitado	Poisson Intensidad de llegada: λ(llegadas por seg) Caso 1: λ=5 para trafico CS Caso 1: λ=5 para trafico CS y λ=15 para trafico PS
Intervalo de medida	4 seg 15 min. 1 hora 1 dia	Al ser el numero de dispositivos fijo y el acceso debe determinarse antes de ocurrir, no hay intervalo de medida	n/a
Tamaño del bloque	10 bytes 200 bytes 1000 bytes	10 bytes 200 bytes 1000 bytes	n/a

Tabla 10 Configuración de los modelos de tráfico [13]

Asociados cada escenario a un supuesto:

- Escenario T1.- para una gran cantidad de usuarios, el proceso global de llegada se puede modelar como un proceso de llegada de Poisson, independientemente del proceso de llegada individual. Bastante realista
- Escenario T2.- gran cantidad de dispositivos generando información a la vez, lo que supone una sincronización dentro de un intervalo de T segundos.
- Escenario T3.- dispositivos heredados de conmutación de circuitos (CS) y de paquetes (PS). No serán de aplicación a nuestras redes LPWAN, por estar orientado a evaluar el impacto en el trafico de voz y datos en redes mixtas que soportan tanto comunicaciones HTC como MTC, que no es susceptible de ser considerado en este documento.

De forma complementaria, se definieron 2 modelos mas de tipo agregado para evaluar prestaciones de una red LTE que conviene mencionar:

Carácterísticas	Modelo 1	Modelo 2
Numero de dispositivos MTC	1000, 3000, 5000, 10000, 30000	1000, 3000, 5000, 10000, 30000
Distribución de llegada	Uniforme en T	Beta en T (α=3; β=4)
Periodo de distribución (T)	60 seg	10 seg.

Tabla 11 Modelos de trafico añadidos para trafico en red LTE

- El modelo 1 sería bastante realista con dispositivos MTC que acceden uniformemente a la red durante un periodo de tiempo de forma independiente (no sincronizado)
- El modelo 2 serían muchos dispositivos sincronizados, mas extremo. La intensidad de tráfico será una variable aleatoria de distribución p(t) con N dispositivos MTC y donde con la oportunidad de acceso "i" podemos obtener:

$$intensidad\ en\ el\ acceso(i) = N \int_{t_i}^{t_{i+1}} p(t)dt$$

$$t_i = tiempo\ de\ oportunidad\ i$$

$$p(t) = \frac{t^{\alpha-1}(T-T)^{\beta-1}}{t^{\alpha+\beta-1}Beta(\alpha,\beta)}; para\ \alpha = 3, \beta = 4$$

La distribución de los intento de accesos de los dispositivos debería estar limita al periodo T ($\int_0^T p(t)dt = 1$).

Estos modelos de tráfico están limitados por supuestos como:

- Número de dispositivos insuficientemente elevado

- Comportamiento no homogéneo de dispositivos
- Efectos de trafico sincronizado sobre el aleatorio
- Influencia de la red en el dispositivo (tipos de calidad de servicio, precio, etc.)

Estas limitaciones han de tenerse en cuenta para no considerar las entidades como independientes con coordinación que conforme aumentan en número aumentan la complejidad tremendamente y para lo que se hacen aproximaciones, como puede ser un modelo de trafico de Poisson cuya tasa varía de acuerdo a único proceso de Markov (MMPP)

3.6 Ejemplos de caracterización de comportamiento de redes LPWAN.

Este trabajo ha dado lugar a un conocimiento de las tecnologías LPWAN y a la forma de caracterización de los modelos de tráfico y las fuentes correspondientes. El siguiente paso sería su simulación, pero los desarrollos existentes resultan estar en fase inicial y no resulta fácil dar con módulos de integración de estas capacidades en simulación de redes. En parte por ser redes que están siendo terminadas de desarrollar. No obstante se ofrece una posible línea acción para trabajo futuro descrita en el Anexo I.

A pesar de esto, se han recabado estudios realizados sobre distintas redes de parámetros relacionados con la capacidad (*performance*) de una red y que dan una idea de cómo modelar tráfico para simular situaciones futuras y verificar el comportamiento de una infraestructura sobre una plataforma de simulación, que es la idea de modelar el tráfico y ver su efecto sobre una red.

La verificación de la eficiencia y eficacia en la gestión del trafico generado por un modelo determinado se terminaría haciendo mediante la comparación de parámetros como el throughtput o la tasa de paquetes erróneos enviados en un cierto tiempo (PER). Dentro de los estudios existentes que trabajan con estos parámetro podemos coger dos de ellos y ver como se ha llegado a resultados y llegar en este estudio a extrapolar resultados. Usaremos dos estudios:

- uno de Lora [**43**] , que no es el objetivo principal del trabajo, pero que dispone de librerías en simuladores como NS3,(un simulador de código abierto y cuyas bonanzas se expresan en el Anexo I) y donde podría integrarse un software de simulación de modelos de tráfico. Refleja el cálculo de thoughtput, que es un parámetro a considerar con modelos de tráfico.
- y otro de NB-IoT [42] por ser el ámbito en el que se centra el TFM, y que podría seguir la línea de la simulación de LoRa, toda vez que las librerías en el simulador correspondiente existan.

3.6.1 Performance en Lora

Según el estudio [**43**] una celda con un Gateway soportaría hasta 10e5 dispositivos finales que enviasen 50 bytes a la hora. El estudio comporta un cálculo teórico de thoughtput, uno práctico sobre una red de test, un cálculo de PER asociado a la cobertura de una celda en distintos entornos y una implementación en simulador de una red LoraWan con los parámetros obtenidos que incrementa el número de nodos y que estima el efecto.

La arquitectura es la descrita más arriba para LoRaWAN, una topología en estrella, así como con dispositivos terminales que se conectan a un Gateway y de ahí a un servidor central de red.

Los niveles físicos y de red tienen las características igualmente descritas y variando sus parámetros se podrán obtener unos resultados u otros.

El nivel físico dispondrá de CSS y FEC y variará la tasa de transmisión de los dispositivos en función de su entorno. Así se hacen medidas dependiendo de:

- el factor de compresión (SF),
- de la tasa de codificación (CR) y
- del ancho de banda del canal (BW),

El nivel de enlace contempla las tres clases de dispositivos definidos en la norma (dispositivos clase A, B y C) con un nivel MAC sobre el nivel PHY que los distingue.

Throughput teórico

Según la especificación la tasa de transmisión se define como $Transmision\ rate = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR$ y se puede representar tal y como aparece en la siguiente figura:

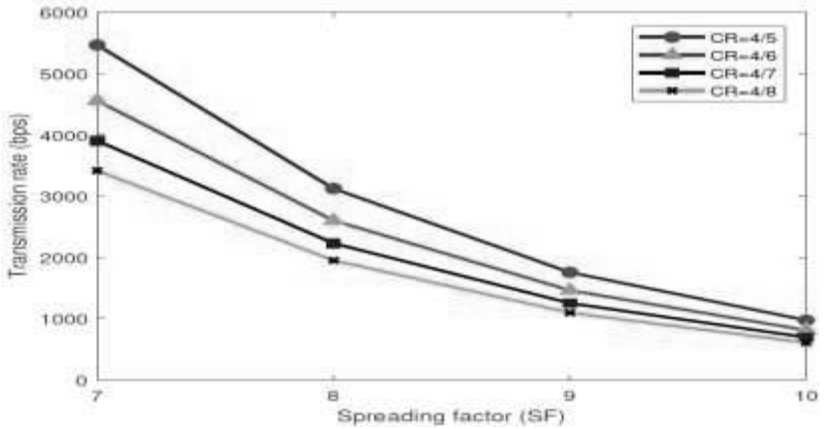


Figura 42 Throughput teórico Lora con distintos SF y CR

Throughput medido

Se platea, a grandes rasgos, un escenario urbano con tres Gateway y dispositivos fijos en interiores y exteriores y dispositivos mòviles.

El banco de pruebas se basa en la transmisión de paquetes de tamaño máximo (255 bytes) y verificar el tiempo que tarda cada paquete en ser enviado. En las siguientes gráficas se representa en cada SF, la media de haber transmitido 100 paquetes con distintos CR.

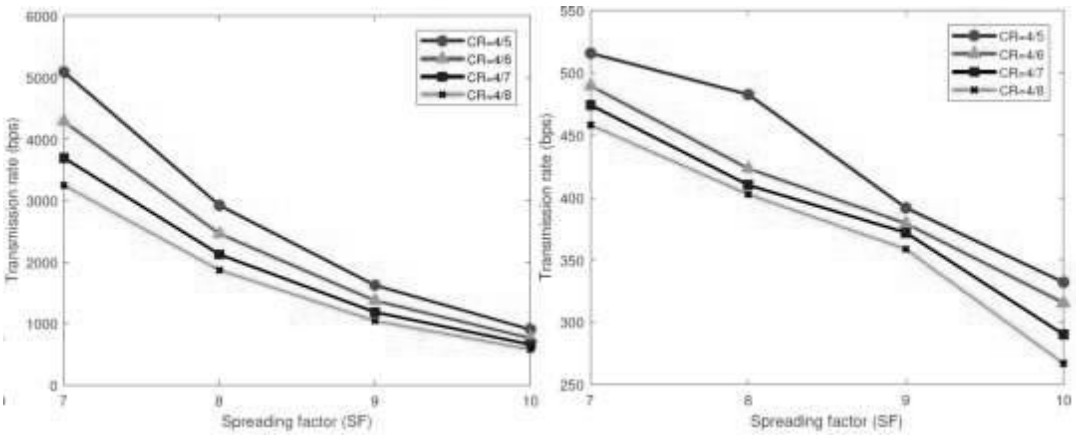


Figura 43 Throughput medido. Nivel PHY izda y nivel APP drcha

El resultado dependerá de estos factores y de dónde se mida, pues si se hace a nivel de aplicación, el efecto de las cabeceras de los distintos protocolos se plasma en una reducción del throughtput en un orden de magnitud. A nivel físico coinciden los valores medidos y calculados.

Otra de las conclusiones obtenidas es que los parámetros radio (CR y SF) afectan al throughput radio, que lo llegan casi a multiplicar por 10, pero a nivel aplicación el efecto es mucho menor (x2)

PER. Calculo y diferencias

Además del throughtput, se maneja la tasa de paquetes entregados o PDR, que podría asimilarse al PER que indicábamos mas arriba. Este parámetro se utiliza para realizar un estudio de cobertura, vinculando el PDR con el nivel de cobertura de una celda para dispositivos en entornos indoor, outdoor, móviles, etc.

Las medidas se hacen con cuatro dispositivos operando en diferentes canales transmitiendo 200 paquetes simultáneamente y se obtienen tasas de mas del 97% e incluso de 0% según la distancia existente entre el elemento y el Gateway, si los dispositivos están indoor, outdoor o moviendose, etc.

Análisis de escalabilidad

Incrementar el numero de elementos para ver el efecto en la red resulta económicamente inviable por lo que se simula una red caracterizada por los valores medido y tomados y se incrementa el numero de dispositivos. Los elementos a tener en cuenta son:

- Simulador .- representa las características LoRaWAN en cada uno de los elementos:
    - Gateways (a nivel PHY),
    - dispositivos de usuario (a nivel PHY y aplicación). A nivel aplicación se modela el trafico indicando si genera trafico deterministico o estocástico o el tiempo entre llegadas
    - parámetros de red (canal de propagación y parámetros de perdidas y zonas de sombra)
- Modelo de recepción de paquetes.- estableciendo cuando un paquete se recibe bien o mal. Vinculado a la potencia recibida respecto un umbral.
- Modelo de propagación .- representa el medio utilizado y su forma de atenuar una determinada señal entre origen y destino.
- Modelo de colisión de paquetes.- representa la simultaneidad de de transmsiones que llegan a un mismo Gateway y su efecto sobre otros parámetros.

Una vez definidos los distintos modelos en sus módulos SW correspondientes se establecen los términos en los que se mide la escalabilidad: el numero de dispositivos finales que puede soportar un Gateway garantizando un PDR determinado. Se fijan los canales del Gateway, la distribución de los disponsitivos y los valores por defecto de los parámetros con los que luego se trabajará:

- Potencia transmitida: 23dBm
- CR 4/5
- BW 125 Khz
- Tamaño de la carga 50 bytes
- Intervalo entre llegadas 20 minutos

Se puede obtener una relación entre los distintos parámetros de la tecnología Lora dentro de un escenario y la tasa de paquetes entregados:

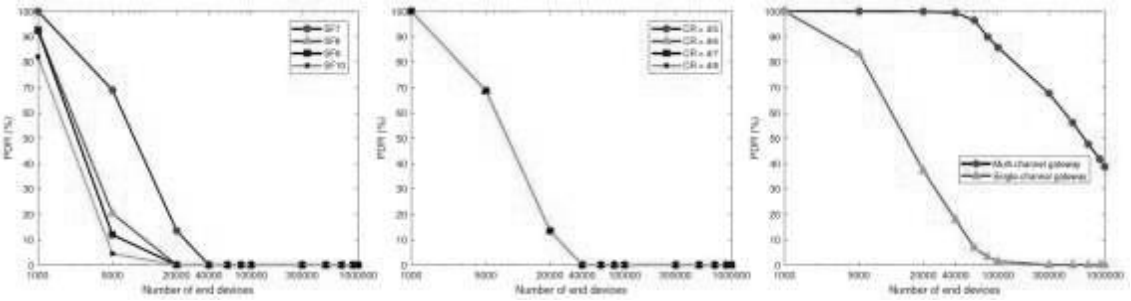


Figura 44 PDR según el SF (izda), el CR (centro) o el numero de canales del Gateway (drcha)

En nuestro caso el que mas nos interesa es el tiempo entre llegadas, que es un factor determinante de los modelos de tráfico definidos:

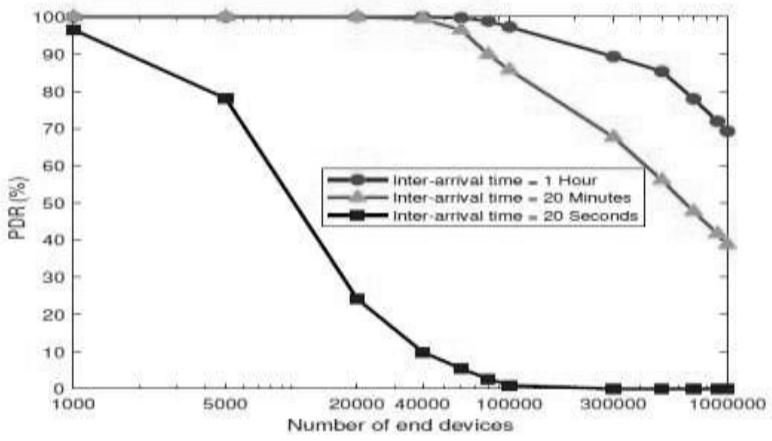


Figura 45 PDR según el tiempo entre llegadas

A menor tiempo entre llegadas menos equipos soporta el Gateway (menor PDR, es decir se pierden mas paquetes).

Aplicación de modelos de tráfico a simulación LoRa

Resultaría interesante a efectos de este TFM reproducir estos resultados para los valores de las tablas establecidos en los puntos relativos a modelos de tráfico, es decir:

- Tamaño de bloque: 10 y 200 bytes. (1000 bytes es de esperar que no lo soporte por ser superior al tamaño máximo de bloque)
- Inter-arrival time (t_{acc}): configurar las llegadas por segundo λ, en función del número de equipos terminales (n) y su tiempo entre accesos (t_{acc} seg). $\lambda=n\ t_{acc}$, Este tiempo entre accesos se configuraría con 4 segundos, 15 minutos, 1 hora y 1 dia.

3.6.2 Performance en NB-IoT

Dentro de los trabajos en esta línea, [**42**] trabaja con la capacidad de acceso al medio. Para ello va a estudiar los mecanismos de backoff (plasmando distintos tipos de comportamiento de los buffers de un UE), caracteriza la probabilidad de que un UE acceda al medio, de que transmita un paquete de forma exitosa y de que el canal esté ocupado.

De nuevo nos encontramos con estudios del throughput de la red, que nos ayuda a caracterizarla, y que se calcula en términos del numero de dispositivos, de la tasa de generación de paquetes, del numero de retransmisiones y de la longitud de la buffer del UE.

Lo que pretende el estudio es dar una idea:

- del impacto del incremento del numero de retransmisiones con un buffer de un determinado tipo,
- de la variación del throughput con los mecanixmos de backoff modelados con una cadena de Markov
- de cómo sería la red variando ciertos parámetros

Para este TFM el valor añadido estará en vincular los parámetros a los modelos de tráfico y obtener las conclusiones que se puedan y orientar las acciones necesarias sobre el escenario del estudio para aumentar el conocimiento de los modelos de tráfico en NBIoT, que es el principal objetivo.

Modelado del sistema y funcionamiento

Para el acceso al medio en el estudio se contemplan N equipos asociados a un canal de la celda (eNB) que tienen un bufer de longitud L con K paquetes que se generan con una tasa λ y se envían con una tasa de transmisión *v.*

Primero se accede al medio por el proceso RAR (con un MCL configurable para las tres zonas de cobertura 144-155-164 dB) tras el cual, si se ha podido establecer la conexión, se inicia la transmisión de datos. A estos efectos se supone:

- que cuando hay una colisión, se reenvía la solicitud de acceso, sin variar potencia o perdidas
- se abre una ventana de reenvíos con ciclo T que incluye un tiempo de backoff que va cambiando si la colisión se repite y un tiempo de transmisión del paquete.
- si hay colisión, se varia el parámetro de retardo (delay)
- la probabilidad de que se transmita con éxito es la de ocupar un canal, tras lo cual se libera

Throughput. Su modelado

Para el cálculo del throughput se parte de la caracterización del mecanismo de backoff, del modelo de cola tipo cadena de Markov y por último, el throughput del sistema.

A modo de resumen podríamos decir que:

- para la caracterización del mecanismo se backoff se parte de que los paquetes se almacenan en el buffer con la probabilidad P_e de que se vacíe y P_s de que se envíen con éxito. Las colisiones, retransmisiones y vaciados de las colas dependerán de las probabilidades de los otros UE.
- Para el modelo de cola bajo la cadena de Markov, cabria significar que para ua cola de longitud K, los estados de la cadena de Markov son K+1 y que la probabilidad de su vaciado dependerá de un periodo T, que será el máximo tiempo de retardo en el mecanismo de backoff mas el tiempo de transmisón de un paquete. Será así T igualmente el tiempo entre estados y con el se trabajará la probabilidad de llegada de los k paquetes a la red NB-IoT.
- El throughput del sistema τ, es el número de paquetes que los UEs envían con éxito por segundo, y que en función de la probabilidad de que la cola este vacía de un UE será $\tau = \frac{\tau'}{T}$ siendo τ´ dependiente de la probabilidad de vaciado de todos los UEs de la red y T es el tiempo medio de servicio mencionado en los estados de la modelación de Markov de la cola del UE. Así pues el throughput del sistema depende de dos cosas:
    - de que solo un UE inicie el acceso y ocupe el canal
    - de que lo haga mas de un UE

Configuración del sistema y resultados

Se define un longitud de paquete L de 512 bytes, una tasa de transmisión ν de 160 kbps, una ventana de contención con los valores $T = \{0,20,30,40,60,80,120,160,240,320,480,960\}$ ms correspondiente a los valores de delay que se envían a UE de backoff. El tiempo de transmisión de paquete será de 25 ms que se combinará con la ventana de contención con W=40 equipos. Finalmente se opta por unos valores iniciales de N=5, R=8,W=40, λ=0,1, K=10 y el se puede ir variando para comprobar su resultado:

- Variar el número de elementos con diferente tasa de generación de paquetes.

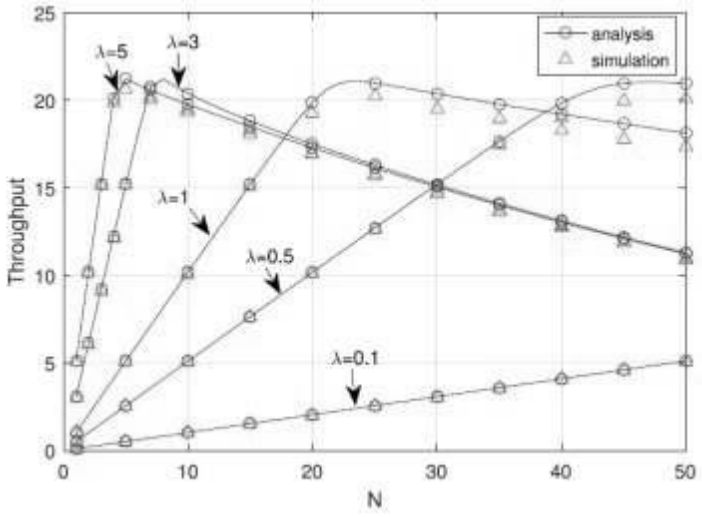


Figura 46 Throughput variando el N y λ

Para poder comprobar que aumentar el numero de accesos a la red con el mismo numero de equipos incrementa el throughput hasta un máximo en el cual el sistema se degrada

- Variar el número de retransmisiones con diferente tasa de generación de paquetes.

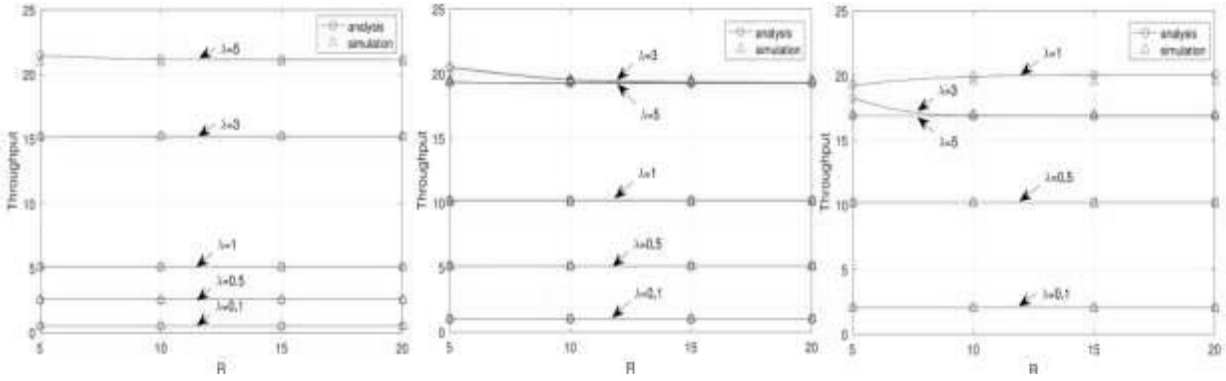


Figura 47 Throughput según N=5 (drcha), N=10 (centro) y N=20 (drcha)

Y poder ver que la influencia es mínima tanto de la tasa de accesos como el numero de retransmisiones

- Variar la longitud de la cola con diferente tasa de generación de paquetes. De donde se consiguen similares resultados. No afecta al throughput
- Calcular la probabilidad de encontrar el canal ocupado, que podrían darnos una idea de la probabilidad de error de paquete, pues se supone que es el único momento en que el paquete no llegue

P_b	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 1$	$\lambda = 3$	$\lambda = 5$
N=5	0.0089	0.0456	0.0937	0.3286	0.7620
N=10	0.0202	0.1050	0.2230	0.8551	0.8869
N=20	0.0430	0.2344	0.5878	0.9342	0.9365
N=30	0.0662	0.3879	0.8562	0.9520	0.9527
N=40	0.0898	0.5980	0.9048	0.9602	0.9605
N=50	0.1140	0.7917	0.9262	0.9648	0.9650

Tabla 12 Probabilidad de encontrar el canal ocupado para la transmisión.

De donde se puede inferir que cuando λ o N es mayor la es mas probable que el canal se encuentre ocupado. Algo de esperar.

Aplicación de modelos de tráfico a simulación NB-IoT

En línea con lo anterior sería deseable incorporar los datos relativos a tamaño de bloque a nivel aplicación y una mayor maniobrabilidad con la tasa de acceso o el tiempo entre accesos conforme a las tablas definidas en el apartado de modelos de tráfico. El objetivo último, ajustando el comportamiento de los UE conforme a un valor fijo es incrementar el número de elementos y su tasa de acceso para encontrar sus valores críticos en relación a un throughput, de forma similar a la Figura 46, pero variando todos los parámetros relativos a tráfico, faltando el tamaño de bloque.

4 Conclusiones

4.1 Conclusiones generales

Este trabajo ha podido exponer el estado del arte de IoT y descripción de redes de área extendida, centrándose principalmente en NB-IoT, que dispone de sus ventajas y desventajas propias de un sistema celular sobre espectro licenciado. Su despliegue en Europa esta teniendo lugar en estos momentos en paralelo con 5G y su importancia se plasma en el cariz geoestratégico dentro del ámbito tecnológico, comercial e incluso político [45] y [46].

Como tecnología novedosa que es, no dispone de la misma variedad de estudios, SW de simulación, etc. que otras tecnologías LPWAN. Mucho menos en asuntos tan concretos como modelos de tráfico.

Se ha podido caracterizar el trafico de una red IoT. (fuentes individuales, flujos de miles de dispositivos agregados,etc.). Estos modelos de tráfico obedecen a unos principios matemáticos y han sido establecidas las condiciones de contorno desde el órgano regulador correspondiente para la evaluación de la red. Estos modelos de tráfico están en función de tres parámetros: el numero de dispositivos conectados, la cadencia con que se conectan o acceden a la red y el tamaño de los paquetes que envían. En base a esto se valoran factores como el throughput o la tasa de paquetes perdidos (o enviados con éxito) y se analiza el comportamiento de la red. No obstante no se han encontrado estudios relacionados directamente con los modelos de trafico definidos por 3GPP ni se han encontrado librerías SW maduras en entornos de simulación para poder llevarlo a efecto.

Con carácter general, dentro de las redes LPWAN, será NB-IoT la que presente mejores prestaciones dentro de las limitaciones inherentes a un mercado de dispositivos de bajo coste en una red que intenta explotar al máximo sus capacidades (batería, data rate, etc.). Esto en parte al uso de espectro licenciado, que aunque por un lado encarece la red, por otro la hace flexible, eficiente, eficaz y versátil frente a sus competidoras SigFox y LoRaWAN.

No obstante para poder evaluar por completo un modelo de tráfico y comparar tres tecnologías con idiosincrasias distintas haría falta establecer escenarios equivalentes, donde posiblemente se explotarían las virtudes de unas y dejarían de explotarse las de otras Así por ejemplo del rango de cobertura de 164 dB de NB-IoT no se dispone en LoraWan, que según los estudios vistos soporta una cantidad elevada de dispositivos, aunque con tasas de transmisión muy alejadas por debajo a las de NB-IoT

4.2 Líneas de trabajo futuro

El modelado de la red y el aplicarle los modelos de tráfico contemplados en la norma nos permitir evaluar su comportamiento y ampliar los elementos necesarios para ofrecer la QoS requrida. Esto de momento en simuladores como NS3 no resulta fácil.

Un posible horizonte es la generación de modelos de trafico sobre NS3 en redes NB-IoT, así como en otras LPWAN. En el Anexo I se ofrece una aproximación realizada sobre el material existente para otra red LPWAN: LoRaWAN.

A partir de lo conseguido en estos trabajos, habría que definir un escenario donde reproducir los modelos de tráfico sobre distintas tecnologías y definir los parámetros objetivo: numero de equipos máximo con determinado throughput o pérdida de paquetes permitido, por ejemplo.

5 Glosario

3GPP Proyecto Asociación de Tercera Generación (3rd Generation Partnership Project)
ETSI Organización de estándares europea
HD-FDD Half-duplex Frecuency Division Duplex
GSM Sistema global para las comunicaciones móviles (Global System for Mobile communications)
IoT Internet de las Cosas (Internet of Things)
IP Protocolo de Internet (Internet Protocol)
ISM Industrial, Scientific and Medical radiofrecuency
ISO Organización encargada de la estandarización de protocolos (International Organization for Standardization)
ITU Unión Internacional de Telecomunicaciones
LoRa-WAN Especificación para redes de baja potencia y área amplia
LPWAN Red de cobertura amplia de bajo consumo (Low-Power Wide-AreaNetwork)
LTE Estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos (Long Term Evolution)
M2M Intercambio de información en forma de datos entre máquinas (Machine to Machine)
MAC Capa de control de acceso al medio
MMPP Markov-modulated Poisson process
MQTT Message Queue Telemetry Transport
MTC Forma de comunicación de datos entre dispositivos que no requieren la intervención humana (Machine-type Communication)
NbIoT Redes móviles de banda estrecha diseñadas para IoT (Narrowband IoT)
PQ Priority Queueing
PS Conmutación de paquetes
QoE Calidad de la Experiencia (Quality of Experience)
QoS Calidad de Servicio (Quality of Service)
Red adhoc Conjunto de redes donde todos los nodos tienen el mismo estado dentro de la red y son libres de asociarse con cualquier otro dispositivo de red
RFC Request for Comments
RFID Identificador por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification)
RTO Objetivo de Tiempo de Recuperación
RTP Real-time Protocol
Sigfox Tecnología LPWAN de protocolo propietario
SLA Acuerdo de nivel de servicio (Service Level Agreement)
TCP Protocolo de control de transmisión
UDP Protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas (User Datagram Protocol)
UE Equipamiento de usuario
Wi-Fi Tecnología que permite la interconexión inalámbrica de dispositivos electrónicos

6 Referencias

[1] Popli, Sakshi, Jha, Rakesh Kumar y Jain, Sanjeef.*A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NBIoT): Architecture, Application and Challenges.* IEEE Journals & Magacines, págs. 16739 - 16776 2019,.

[2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M.Ayyash *Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications.*,., IEEE Commun. Surveys Tuts4th Quart., 2015.

[3] Alzate, Marco Aurelio. Modelos de Trafico en Análisis y Control de Redes de Comunciaciones.

[4] M.Chen, Y. Miao, Y Hao and K. Hwan. pp 20557-20577, s.l. Narrow Band of Internet of Things.: IEEE Access, Vol. 5 2017,.

[5] A. Rico-Alvarino et al. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications.pp 14-21, s.l. : IEEE Commun Mag., Jun. 2016, Vol. 54.

[6] M. Elsaadany, A. Ali, and W. Hamouda. pp 2544-2572, s.l. : Cellular LTE-A technologies for the future Internet-of-Things: Physical layer features and challenges. IEEE Commun. Surveys Tuts., 4th Qt 2017, Vol. 19.

[7] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. pp14-21, s.l. : ICT Express, Mar. 2017, Vol. 3.

[8] TS36.211, 3GPP Evolvel Universal Terrestial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestial Radio Access Network (E-UTRAN); Physical Cahnnels and Modulation.. Sept 2016., Vols. www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.211/36211-d30.zip.

[9] 3GPP TS (2011-06), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specication Group Radio Access Network & EPC User Equipment Conformance Speficaion, Release 8, 3GPP, 2011. 2011.

[10] Rohde & Shwarz, J. S. Roessler. LTE-advanced: Technology introduction-(3GPP Rel.12)," Munich, Germany : s.n., 2015, Vol. White Paper IMA252.

[11] 3GPP. s.l. : Understanding 3GPP Release 12 Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements. http://www.5gamericas.org /files/6614/2359/0457/4G_Americas_-_3GPP_Release_12_ Executive_ Summary_-_February_2015.pdf, feb 2015.

[12] GSM Association. Official Document CLP.28 - NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature set Requirements. Abr. 2018.

[13] 3GPP TS 36.101 version 13.6.1 Release 13. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.

[14] 3GPP TS 36.101 version 14.5.0 Release 14. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception .

[15] 3GPP TS 36.101 version 15.3.0 Release 15. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception .

[16] Rohde - Schwarz. Narrowband Internet of Things Whitepaper. https://www.rohde-schwarz.com/no/applications/ narrowband-internet-of-things-white-paper_230854-314242.html. [En línea] [Citado el: 08 de 04 de 2019. Schulz, B.

[17] http://sharetechnote.com/. [En línea] [Citado el: 08 de 04 de 2019.

[18] 3GPP TSG RAN WG1 NBIoT NB-DMRS Design, document R1-161810,. [aut. libro].

[19]. Eric Wan, Xingqin Lin, Ansuman Adhikary,Asbjörn Grövlen,Yutao Su. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of iot NB-IoT

[20] Luca Feltrin, Galini Tsoukaneri, Massimo Condoluci, Chiara Buratti, Toktam Mahmoodi,Mischa Dohler,Roberto Verdone. s.l. : IEEE, NarrowBand-IoT: A Survey on Downlink and Uplink Perspectives 2018..

[21] wikipedia. Espectro ensanchado. [En línea] [Citado el: 11 de abr de 2019.] https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_ensanchado# Sistemas_de_frecuencia_modulada_pulsada_(o_Chirping).

[22] Lora Alliance. [Citado el: 11 de 04 de 2019.] https://lora-alliance.org/.

[23] https://lora-alliance.org. [En línea] https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf.

[24] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, Fenand Meyer. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT. *ICT express. www.sciencdirect.com.* 2019.

[25] .https://www.disk91.com. https://www.disk91.com/2017/technology /internet-of-things-technology/sigfox-lorawan-network-architecture-and-network-kernels/. [En línea]

[26] www.aprendiendoarduino.com. https://aprendiendoarduino. Wordpress .com/category/sigfox/. [Citado el: 12/ 04/2019.]

[27] www.arduino.com. https://www.aprendiendoarduino .com/2018 /03/05/redes-lpwan/. [En línea] [Citado el: 13 de 04 de 219.]

[28] Sacristán, Ángel Gómez..Análisis y caracterización del tráfico HTC+MTC en una Smart City Modelado de fuentes y Calidad de servicio Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, Julio 2018.

[29] 3GPP TR 43.868 GERAN improvements for Machine-Type Communications (MTC) (Release 12),. 2014.

[30]. Tobias Hosfeld, Florian Metger, Poul E Heegard. Traffic Modeling for Aggregated Periodic IoT Data

[31] Wikipedia. *https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_colas.*

[32] *3GPP TS22.368 V14.0.1 Service requirements for machine-type communications.* 2017.

[33] Alexandru Lavric, Valentin Popa. s.l. *Internet of Things and LoRaTM Low-Power Wide Area Networks: A Survey.*: ieee, 2017.

[34] Dobato Ingalaturre, Gabriel; Integración de un modelo de energía en la simulación de redes LoRaWAN en NS-3 UOC.junio, 2018

[35] Machado González, Maria Luisa; Estudio de NB-IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN; UOC enero,2019 http://hdl.handle.net/10609/87205

[36] Xingqin Lin, Olof Liberg, Ali Behravan, Emre A. Yavuz, Martin Van Der Zee. Overview of 3GPP Release 14 Enhancement NB-IoT; Andreas Hoflund, IEEE. Nov.2'17

[37] Almudena Diaz Zayas, F. Javier Rivas Tocado 3GPP NB-IoT, tecnología y herramientas de medida; Universidad politécnica de Valencia

[38] Ns3 project. NS3. www.nsnam.org. https://www.nsnam.org/docs/release/3.29/tutorial/html/index.html

[39] Antonio Conejero Diaz. Redes de Sensores Inalámbricos, su simulación en el Network Simulator versión 3. Universidad de Jaén. Escuela Politecnica Superior de Linares. Junio 2014

[40] Modulo LoRaWAN para NS3 https://github.com/DvdMgr/lorawan agosto 2018

[41] Ns3 project. NS3. www.nsnam.org. https://www.nsnam.org/docs/models/html/flow-monitor.html

[42] Throughput Modeling and Analysis of Random Access in Narrowband Internet of Things. Yuyi Sun, Fei Tong. IEEE.

[43] Throughput, Coverage an Salability of LoRa LPWAN for Internet of Things

[44] Aplicaciones del modelo On/Off al tráfico agregado en las redes de comunicaciones. Andres Parra León, Elkin M. Piedrahita, Octavio Salcedo

[45] https://www.larazon.es/internacional/putin-explotara-el-5g-de-huawei-en-rusia-MO23697308

[46] https://www.abc.es/tecnologia/informatica/soluciones/abci-esta-juego-redes-y-significa-huawei-lidere-esta-tecnologia-201905261513_noticia.html

7 Anexo I Simulación

Este trabajo ha dado lugar a un conocimiento de las tecnologías LPWAN y a la forma de caracterización de los modelos de tráfico. No obstante hemos podido comprobar que llevar a cabo simulaciones para la obtención de datos con NB-IoT en este sentido resulta complicado por:

- No existir librerías de simulación de las tecnologías en todas y de forma equivalente, al menos en NS3
- La definición de entornos de simulación equivalentes dadas las diferencias entre las tecnologías. Siendo tecnologías LPWAN, cada una de las mismas tiene un perfil que pasamos a describir mas abajo y que da fe de la dificultad.

El propósito de este anexo es dar lugar a una línea de trabajo futuro basada en lo existente, pero orientada a lo que está actualmente en desarrollo. Todo dentro del simulador NS3, para redes LPWAN.

7.1 Descripción del simulador

El NS-3 es un simulador de redes de eventos discretos con un enfoque especial para sistemas basados en Internet. Funciona en sistemas basados en UNIX, Linux y Windows. En este caso ha sido instalado en la versión 18.10 de Ubuntu, y la versión utilizada del simulador ha sido la 3.29.

En NS-3 las librerías o los componentes para la simulación están escritos en C++ y tiene soporte para permitir que los programas para la simulación sean escritos en Phyton. [38]

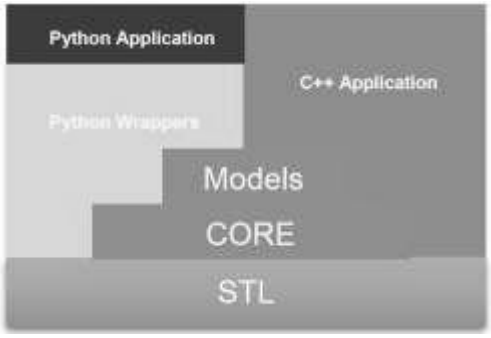


Figura 48 Modelo de programación en NS 3

NS-3 es una herramienta de simulación esta principalmente dirigido a redes basadas en IPv4 e IPv6, aunque también soporta otras arquitecturas como redes de IoT. NS-3 puede ser modificado y ampliado por los usuarios basándose, o no, en ejemplos existentes.

Para este TFM se ha detectado una falta de implementación de NB-IoT, por lo que se establecerán las condiciones de contorno en redes similares pero mas maduras que disponen de librerías para su implementación, prueba y verificación: LoRaWAN.

La elección de NS3 ha sido motivada por su disponibilidad pública bajo licencia GNU GLPv2 para su uso y desarrollo, así como sus principios de diseño que van orientados al campo de la investigación y al ámbito educativo. Los inconvenientes encontrados, como son la ausencia de librerías completas de NB-IoT, se han superado mediante el uso de librerías existentes (LoraWan) que podrían permitir marcar el diseño de un sistema abstracto para cuando éstas se definan.

7.1.1 Implementación modular

NS-3 posee una implementación modular que contiene diferentes librerías que dan soporte al simulador (también es posible que los usuarios desarrollen sus propias librerías). Los mas importantes son:

- Core library: para aspectos genéricos del simulador.
- Simulator library: define los parámetros requeridos para la ejecución de una simulación.
- Common library: define objetos independientes como paquetes genéricos.
- Node library: define las clases abstractas de objetos fundamentales del simulador como nodos, canales y dispositivos de la red.
- Internet-node: define los modelos relacionados con Internet, por ejemplo, los protocolos TCP y UDP.

Los programas de ejecución de NS-3 pueden ser construidos total o parcialmente asi como estática o dinámicamente vinculados a las librerías.

Los distinto elementos base se organizan por capas que van incorporando las distintas funcionalidades

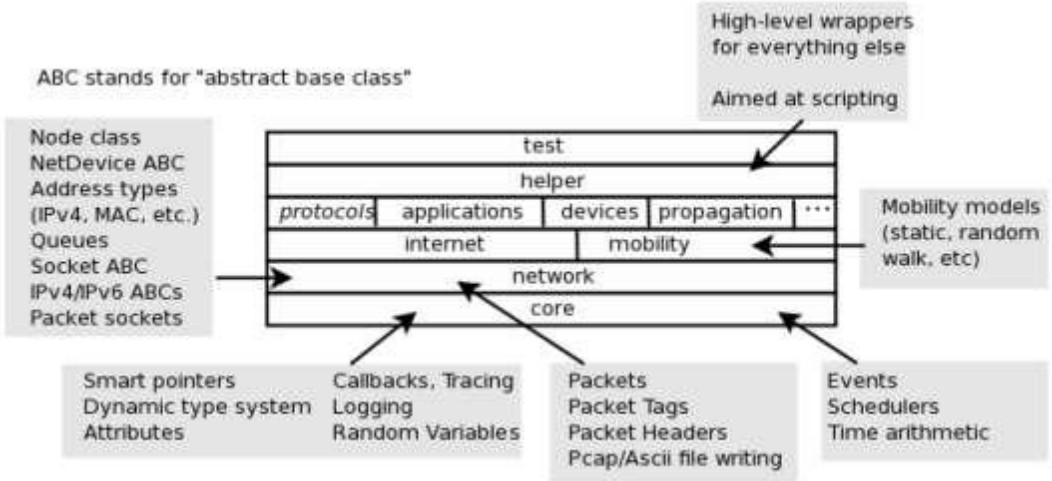


Figura 49 Estructura de software por capas [38]

NS-3 ofrece soporte para:

- Construcción de redes virtuales (nodos, canales, aplicaciones), planificadores de eventos, generadores de topologías, temporizadores, variables aleatorias y otro tipo de objetos para la simulación de sistemas de eventos discretos basados en Internet y en otros tipos de redes.
- Simular procesos que emiten y consumen paquetes de red reales.
- Simular múltiples procesos en diferentes máquinas.
- Animar las redes simuladas.
- Detección, registro, cálculo y estadísticas de la simulación.

7.1.2 Objetos Clave

Cuando se quiere llevar a efecto una simulación en NS3 se trabajan con los siguientes elementos u objetos clave.

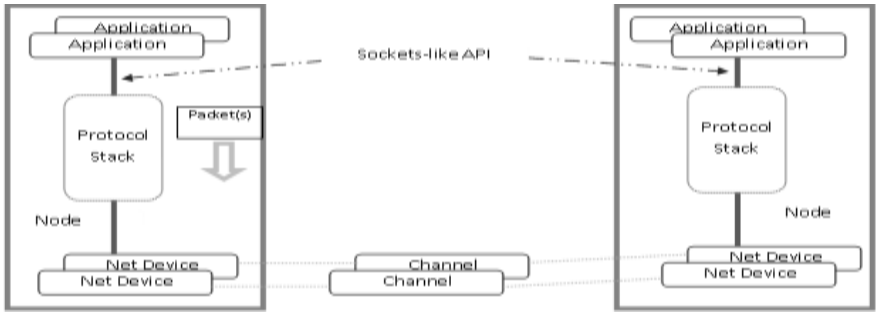


Figura 50 Arquitectura de objetos clave de una simulación NS-3 [39]

- Node. Clase instanciable principal de NS-3. El diseño de esta clase permite la incorporación de las clases que implementan aplicaciones y e interfaces físicos de interacción con el medio de un dispositivo (Application y NetDevice)
- NetDevice y Channel. Interfaz físico de un dispositivo y camino lógico que sigue la información respectivamente
- Packet .- Este objeto contiene un buffer de bytes que corresponde a un paquete de una red real
- Applications.- Procesos definidos para generar tráfico por el usuario y simular el comportamiento de la red. NS3 tiene un framework para desarrollar diferentes tipos de aplicaciones con diferentes tipos de tráfico. Se crea y se asocia a un nodo
- Topology helpers.- Permiten asignar direcciones físicas, instalar dispositivos de red en un nodo, instalar una pila de protocolos y conectar los NetDevices a un Channel, así como generar Nodes en gran numero a través de Node Containers.

7.2 Implementación utilizando las librerías mas desarrolladas

La implementación de librerías NB-IoT están siendo desarrollada en estos momentos, por lo que resulta difícil encontrar implementaciones fiables de los módulos necesarios para llevara a efecto una prueba de distintos modelos de tráfico.

No obstante, las otras tecnologías con las que se ha comparado son tecnologías más maduras y que cuentan con dicho material.

LoRaWan cuenta con los modulos NS3 necesarios en https://github.com/DvdMgr/lorawan/blob/master/doc/lorawan.rst para implementar una red de diferentes características. Cualquier desarrollo de redes similares requerirán diseños parecidos, caracterizando valores de frecuencias, throughput y demás en base a la tecnología en si.

7.2.1 Diseño modular de la tecnología

Módulos: su diseño

Se dispone de dos modelos principales para el módulo LoRaWAN,

- uno para el nivel físico de LoRa que incorpora las características de los chips y las transmisiones LoRA y
- otro para el nivel MAC de LoRaWan, que adapta el nivel 2 a las especificaciones oficiales.

Estos modelos se representan con las clases base *LoraPhy y LoraMac*. A partir de esas se van creando clases que modelan las peculiaridades de los dos dispositivos de red:

- el dispositivo terminal a través de la clase *EndDeviceLoraPhy* para el nivel físico y *EndDeviceLoraMac* para el nivel MAC
- el gateway análogamente, a través de las clases *GatewayLoraPhy* y *GatewayLoraMac*

Además se usan aplicaciones *Network Server* que se montan en los nodos de la red para el control del despliegue inalámbrico a través de la aplicación *Forwarder*, en los gateways.

El modelo de la capa física PHY

Teniendo en cuenta fundamentalmente la sensibilidad y ortogonalidad de LoRa se estima si una transmisión es correcta o incorrecta partiendo de la sensibilidad del dispositivo y del modelado de la posible interferencia existente con otras transmisiones.

Se usa la clase *LoraChannel* (similar al paradigma NS3 de clase *Channel*) para interconectar niveles físicos de los distintos dispositivos de la red. Esta interconexión se hace con un método

StartReceive y reporta status y permite hacer un seguimiento al SW de ayuda (*"helper"*) *LoraInterferenceHelper* los paquetes recibidos, esperados e interferencia. Cuando un paquete se recibe por PHY, se activa *LoraInterferenceHelper* inmediatamente y asegura que el paquete esta listo para recibirse, es decir que cumple las condiciones de paquete válido (se haya dado que el receptor haya pasado a IDLE, se haya tenido una potencia superior al nivel de sensibilidad en la frecuencia y el SF correctos).

Si el nivel PHY valida un paquete, inicial una llamada a la función *EndReceive* con la duración del paquete y tras la cual da paso al método *IsDestroyedByInterference* de *LoraInterferenceHelper* para ver si hay interferencia suficiente (compara la potencia recibida con los datos de una matriz de aislamiento) para dar por perdido el paquete o pasarlo al nivel MAC.

Esta implementación tiene sus peculiaridades en el Gateway, por lo que el modelo Gateway incorpora los 8 canales de recepción en paralelo del dispositivo tipo (sx1301). El objeto *GatewayLoraPhy* gestiona esos caminos y traslada al *LoraInterfernceHelper* del Gateway, que ya tiene la información de *ReceptionPaths*, la decisión de si el paquete ha sido correctamente recibido o no.

El modelo de acceso al medio (MAC)

Consta de modelos que ayudan a implementar la norma LoRaWAN, definiéndose clases para:

- cabeceras, con dos tipos *LoraMacHeader* y *LoraFrameHeader*, pudiendo incluir la de trama los sismas para direccionamiento, serialización y comando MAC que se definen en la norma
- comandos MAC, haciendo uso extendido de la clase *MacCommand* para serialización, comandos, etc.
- direccionamiento, con la clase *LoraDeviceAddress*, para todos los ED´s,
- canales lógicos, para los que asigna *LogicalLoraChannelHelper* a cada llamada *LoraMac*, para hacer un seguimiento de cada canal lógico representado por *LogicalLoraChannel* con sus alusiones a la clase *subBand* y
- ciclos de ocupación, dado que trabaja en banda no licenciada con limitaciones de transmisión, la clase *LoraMac* permite registrar cada transmisión y encolarlas para la siguiente ventana de transmisión conforme a regulación, manejando parámetros como el tiempo de duración de transmisión de un dispositivo (*t_{rm air}*) o el ciclo de ocupación como fracción *\rn dc*

Asimismo permite la simplificación del servidor de red NS como una aplicación montada en un nodo que se conecta al Gateway con un enlace *PointToPoint.*

7.2.2 Uso de las clases y módulos.

Las clases y los módulos siguen los principios típicos de NS3, así como el SW de apoyo llamado *helpers* mencionado mas arriba.

Helpers

El módulo lorawan incluye helpers para configurar los niveles PHY y MAC en muchos dispositivos de forma automática y sencilla. Las clases LoraMacHelper y LoraPhyHelper pueden ser llamadas por el objeto LoraHelper para configurar un dispositivo por completo, indicando con SetDeviceType si es un ED o un Gateway antes de usar el método Install.

El factor de expansión SF se contempla mediante el método *SetSpreadingFactorsUp* basado en las condiciones del canal e intentando minimizar el tiempo en el aire TOA de los paquetes, haciendo el SF lo mas pequeño posible.

Atributos

Se dispone únicamente de los atributos Interval y PacketSize en PeriodicSender para manejar el flujo de paquetes de la aplicación (intervalo entre paquetes y el tamaño de los mismos)

Trace Sources

Estos elementos permirán hacer un seguimiento de los eventos que se vayan dando en la simulación, y que se centran principalmente en la vida del paquete.

Nivel PHY	Trace source	Qué indica
LoraPhy	StartSending	Nivel PHY: inicia tx de paquete
	PhyRxBegin	Nivel PHY: recibiendo un paquete
	PhyRxEnd	Nivel PHY: fin recepción de paquete
	ReceivedPacket	Nivel PHY: paquete recibido
	LostPacketBecause Interference	Paquete perdido por interferencia
	LostPacketBecause UnderSensibility	Paquete perdido por potencia rx<sensibilidad
EndDevice LoraPhy	LostPacketBecause WrongFrecuency	Paquete entrando por la frecuencia distinta a la de escucha por PHY
	LostPacketBecause SpreadingFactor	Paquete entrando con un SF distinto a la de escucha de PHY

Gateway LoraPhy	EndDeviceState	Información de seguimiento del nivel PHY del dispositivo
	LostPacketBecause NoMoreReceivers	Paquete perdido por falta de camino disponible
	OccupiedReception Paths	Información de seguimiento de caminos de recepción ocupados (hasta 8)
LoraMAC	CannoSendBecause DutyCycle	Información de seguimiento relativa a paquetes del nivel de aplicación que no se pueden enviar por limitaciones de ciclo de uso del medio
	DataRate	Información de seguimiento de la tasa de transmisióndel dispositivo
EndDevide LoraMac	LastKnownLink Margin	Información relativa la margen del enlace de subida. Gestionada via comando MAC *LinkCheck*
	LastKnown GatewayCount	Información de seguimiento de número de gateways disponibles para un UE
	AggregatedDuty Cycle	Inforamción de seguimiento de conjunto de las limitaciones por ciclo de uso
LoraChannel	PacketSent	Paquete enviado.

7.2.3 Ejemplos y tests.

En las librerías implementadas para LoRaWAN se han llevado a efecto trabajos de implementación de redes y tests de las mismas que se van a utilizar para someterlas a distintos modelos de tráfico y verificar los valores esperados. Así tenemos

Ejemplos de redes

- Una red LoraWAN sencilla. Un ED conectado a un GW donde ver como un paquete transita desde el nivel de APP de un ED al nivel MAC de un Gateway
- Un servidor de red. Basándose en el anterior ejemplo, se añade un servidor de red y se permite ver la comunicaciones entre esos elementos
- Una red LoraWAN completa. Implementación de miles de dispositivos y decenas de gateways. Cada dispositivo ED con un PeriodicSender, se permite hacer un seguimiento de paquetes enviados y recibidos, con algunas estadísticas al final de la simulación basándose en trazas en el Gateway y no en el servidor.

Tests

Contenidos en lorawan-test-suite.cc, están vinculados a las clases *LoraInterferenceHelper; LoraDeviceAddress* y *LoraDeviceAddressHelper; LoraFrameHeader y LoraMacHeader ReceivePath* y *GatewayLoraPhy; LogicalLoraChannel* y *LogicalLoraChannelHelper* LoraPhy EndDeviceLoraPhy y LoraChannel

7.3 Descripción del escenario

El escenario propuesto permite generar tráfico que se ajusta a los modelos expuestos mas arriba y ver su efecto para los valores de aquellos parámetros que distinguen a las tecnologías, y mas concretamente a NB-IoT.

El escenario será una red de sensores con un concentrador, llamado de una manera u otra según la tecnología, que recaba la información de un numero de sensores por área. El número de sensores por celda varía y la ocupación y conveniencia depende de otras características ya contempladas (numero máximo de mensajes por elemento al dia, ancho de banda, etc.). Dado que este trabajo se centra en NB-IoT, el numero de elementos por nodo será de 53.000 por ser el indicado como máximo mas arriba.

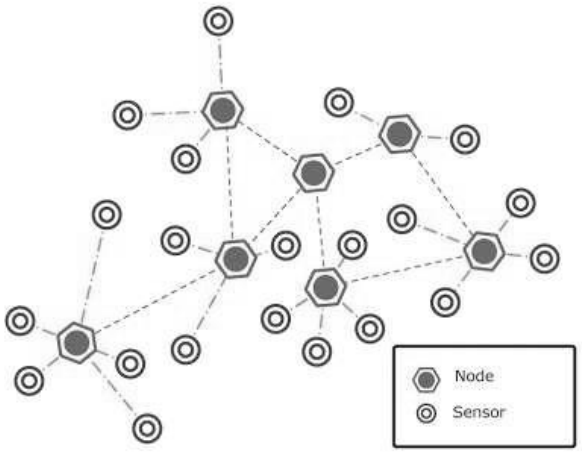


Figura 51 Escenario de pruebas

El propósito sería simular un acceso simultáneo y progresivo de un 20 – 40 – 60 – 80 – 100 % del número máximo de dispositivos asumibles por una celda en cada tecnología en un intervalo de tiempo dado. En cada una de esas condiciones se verificará el throughput y el número de paquetes perdidos o su porcentaje.

Las llegadas, contempladas como los paquetes que acceden a la red, se considerarán equivalentes nodos accediendo a la red con el fin de poder caracterizar el comportamiento de esta última en relación al numero de nodo que es el factor mas diferenciador entre las tecnologías.

El trafico se ajustará a los tres modelos de TR 43.838 para fuentes agregadas. En concreto a los modelos 1 y 2 pues el 3 esta orientado a ver el impacto en redes mixtas (con voz y video) y las redes aquí contempladas, en principio no dan cabida a este tipo de tráfico.

Para el modelo 1, las tasas de acceso a la red, para un número máximo de 53000 dispositivos por celda accediendo simultáneamente por tramos y con intervalos de medida 5 segundos, 15 minutos, 1 hora y 1 día, serán por lo tanto:

λ (llegadas por segundo)						Numero de dispositivos que acceden simulteamente					
						10%	20%	40%	60%	80%	100%
numero máximo de nodos	NB-IoT	53000				5300	10600	21200	31800	42400	53000
Intervalo de medida	5	seg	5	seg	NB-IoT	1060,00	2120,00	4240,00	6360,00	8480,00	10600,00
	15	min	900	seg	NB-IoT	5,89	11,78	23,56	35,33	47,11	58,89
	1	hora	3600	seg	NB-IoT	1,47	2,94	5,89	8,83	11,78	14,72
	1	dia	86400	seg	NB-IoT	0,06	0,12	0,25	0,37	0,49	0,61

Tabla 13 Calculo de tasa de llegadas a la red

Esos accesos se pueden hacer para transmitir bloques de 10, 200 y 1000 bytes, pudiéndose observar los resultados para cada uno de ellos.

Para el modelo 2 se calcularán sobre las distintas redes un acceso coordinado. Tendremos hasta 53.000 dispositivos (por tramos del 10 al 60 por ciento de esa cantidad) coordinándose para transmitir bloques de 10, 200 y 1000 bytes y cuya duración será mayor o menor según la tecnología, si es que puede hacer llegar esas cantidades de información.

7.4 Descripción de las medidas

Las medidas de throughput y paquetes perdidos representará el comportamiento de las redes ante la carga de cada modelo de tráfico presentado en el punto anterior.

Estas medidas las ofrecen distintos marcos de NS3 en función de la implementación de las tecnologías, generándose de hecho medidas mas concretas. Para el caso de paquetes perdidos se puede calcular la probabilidad de pérdida de paquetes o Packet Error Rate (PER) y que nos dará una idea del porcentaje de paquetes susceptibles de ser descartados en determinadas condiciones de error (errores de bit en un paquete por errores en el canal, descarte por tratamiento de colas, error en la recepción por el tratamiento de los paquetes de datos, etc.) En nuestro caso las pruebas se ceñirían a la implementación de la red (en la tecnología que corresponda) y analizando los niveles de acceso al medio y físico. El PER nos indicará la probabilidad de error de paquete y su descarte a partir de

la inyección de tráfico definida por el modelo ajustándose a las características de tamaño de bytes en los tipos de mensajes que permita la red.

$$PER = \frac{\text{PAQUETES CON ERROR}}{PAQUETES\ ENVIADOS\ EN\ T}\ \%$$

La medida de throughtput permitirá verificar la evolución de la capacidad del canal establecido para la red. Se partirá de la búsqueda de una señal de inicio temporal de envio de paquetes, una señal de final de recepción de paquetes y el contador de paquetes enviados y recibidos entre esos dos momentos. A continuación se debe considerar el modelo de trafico seleccionado, punto de la red donde hacemos la medida y el numero de bytes efectivos (o reales) que se quieren medir. En este estudio se dará prioridad a los bytes por segundo, de manera que el bloque de datos pueda variar conforme al modelo de tráfico.

$$THROUGHPUT = \frac{\text{PAQUETES RECIBIDOS}}{T} \rightarrow bits\ por\ segundo$$

Tanto un parámetro como otro han sido tratados en un gran numero de estudios, donde se tratan escenarios [**42**] que podrían ser considerados en futuros estudios. Dependiendo de la implementación podrán ser paquetes por segundo, bits por segundo, etc. Además la caracterización del acceso al medio mediante colas, o el tiempo de backoff para reintentos de transmisión, o incluso la implementación de los distintos niveles de cobertura de las distintas tecnologías permiten añadir variables que condicionen su tratamiento, y que quedan fuera de este estudio ceñido a los modelos de datos y las implementaciones de las redes existentes en un mismo entorno de simulación.

En el apartado correspondiente a conclusiones se incidirá en estos parámetros y en su forma de interpretarlos, medirlos y compararlos entre redes.

7.5 Implementación de las medidas

Dado que las clases que tenemos son básicamente las siguientes

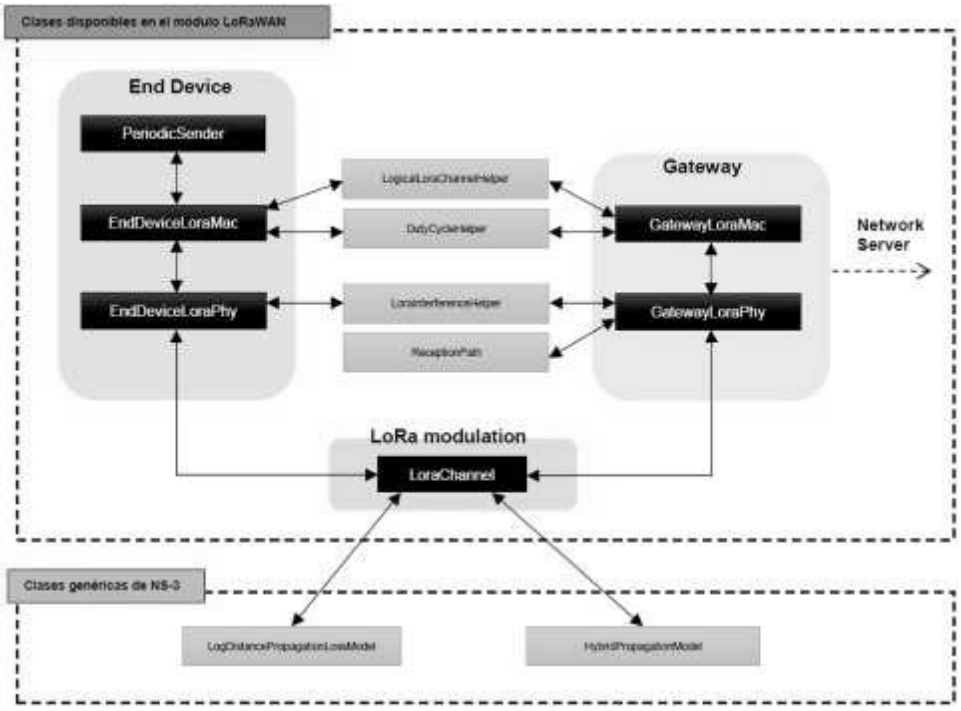


Figura 52 Clases definidas en el NS3 para LoraWAN

La propuesta consistiría en un diseño que aprovecharía al máximo los módulos existentes para la inyección de tráfico conforme sea necesario y hacer uso de los indicadores.

En el caso de LoraWAN, y obviando los mas genéricos, se hará uso fundamentalmente de varios elementos:

- PeriodicSender. Se aprovecharía la lógica de generación y envío de paquetes hacia el Gateway para configurar tamaño del bloque a enviar. Esta instanciación de la aplicación con el mismo tamaño de bloque se hará a todos los elementos de la red y con un tiempo de medida que se hará fijo, aunque se podría utilizar una distribución uniforme.
- Traces. Haciendo uso de las capacidades de notificación de las fuentes de datos enviados y recibidos , con el control del tiempo podemos obtener cualquier cálculo relacionado, tanto a nivel físico como MAC.