
NB-IoT

Tecnologías celulares *narrow-band*

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone



MÁSTER EN INTERNET DE LAS COSAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

David Sánchez Rosado

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid

Convocatoria septiembre 2019

Calificación: Sobresaliente (9)

NB-IoT

Tecnologías celulares *narrow-band*

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

Curso académico 2018/2019
Máster en Internet de las Cosas

Dirigida por los Doctores
Francisco D. Igual Peña
José Ignacio Gómez Pérez

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid

Convocatoria septiembre 2019

Calificación: Sobresaliente (9)

Agradecimientos

A mi mujer, sin cuyo apoyo no habría podido compaginar este master con mis obligaciones personales y profesionales.

A Telefónica y Vodafone, tanto a sus equipos comerciales como técnicos, por su apoyo y cesión desinteresada de los medios necesarios para el análisis de su oferta tecnológica.

A los directores de este TFM, Fran y Nacho, por confiar en mí un estudio tan relevante para sus proyectos actuales.

A la Universidad Complutense y a los profesores que han impartido las asignaturas del curso, por la oportunidad que me han dado, por su compromiso docente y su buen hacer.

Resumen

Asistiendo actualmente a los primeros despliegues del futuro 5G en España, permanecen sin cubrir las necesidades de conectividad para proyectos IoT, caracterizados por diseños de redes con dispositivos de bajo consumo, bajo coste y alta cobertura.

La gran variedad de alternativas “bajo consumo/larga distancia” (LPWAN), tanto en el espectro licenciado como en el no licenciado, donde compiten redes, protocolos y fabricantes en un ecosistema poco estandarizado, genera cautela a la hora de apostar por una arquitectura IoT u otra.

Las ventajas en implantación y coste para propuestas como LoRa, 6LowPan o Sigfox, compiten con las características de volumen de datos, velocidad de transmisión, seguridad y cobertura de los nuevos estándares LTE-M y NB-IoT, publicados por 3GPP hace tan sólo año y medio.

En este contexto, las empresas, siempre cautas a la hora de realizar sus inversiones en I.T., optan para sus proyectos IoT por las alternativas de conectividad LPWAN que ofrezcan una mayor confianza en cuanto a escalabilidad y calidad de servicio.

Como se recogen en los últimos análisis de mercado del sector de telecomunicaciones, las perspectivas de crecimiento para NB-IoT son muy prometedoras, llegando a alcanzar un “share” de las tecnologías LPWAN del 48% para el año 2025 (ver fig. A.3).

Iniciamos este TFM con un enfoque teórico, donde se desgranan las características técnicas de NB-IoT, su encaje y relación con otras alternativas del esquema de radio frecuencias, así como el horizonte de alternativas LPWAN donde convive y puede coexistir como solución IoT.

Sobre esa base teórica, se desarrolla el enfoque práctico que permite conocer el estado de madurez de esta tecnología de comunicación celular, para la que aún son limitados los casos de uso reales en el momento de abordar este proyecto.

Las dos operadoras de telefonía, cuyo servicio NB-IoT ha sido analizado, son Telefónica y Vodafone.

Del análisis de los test realizados en campo y en laboratorio, obtendremos las conclusiones necesarias para evaluar la idoneidad de su oferta NB-IoT como alternativa de comunicación en un proyecto ya existente y desarrollado sobre otra tecnología LPWAN: “Predicción de radiación solar a corto plazo” [26].

Palabras clave

LPWAN, licensed / unlicensed spectrum, LTE, NB-IoT, LTE-M, 3GPP, Vodafone, Telefónica, LoRaWAN.

Abstract

Currently, attending the first deployments of the future 5G in Spain, the connectivity needs for IoT projects, characterized by network designs with low consumption devices and low cost and high coverage, remain uncovered.

The wide variety of “low consumption / long distance” (LPWAN) alternatives, both in the licensed and non-licensed spectrum, where networks, protocols and manufacturers are competing in a poorly standardized environment, generate caution when betting on an architecture IoT or other.

The advantages in implementation and cost for proposals such as LoRa, 6LowPan or Sigfox, compete with the security and coverage features of the new LTE-M and NB-IoT standards, published by 3GPP only a year and a half ago.

In this context, companies, always cautious when making their investments in I.T., opt for their IoT projects for LPWAN connectivity alternatives that offer greater confidence in terms of scalability and quality of service.

As reflected in the latest market analysis of the telecommunications sector, the growth prospects for NB-IoT are very promising, reaching a share of LPWAN technologies of 48% by 2025.

We begin this TFM with a theoretical approach, where the technical characteristics of NB-IoT fit and relationship with other alternatives of the radio frequency scheme are broken down, as well as the horizon of LPWAN alternatives where it lives together and can coexist as an IoT solution.

On this theoretical basis, the practical approach that allows to know the maturity status of this cell communication technology is developed, for which the actual use cases are still limited at the time of addressing this project.

The two telephone operators, whose NB-IoT service has been analyzed, are Telefónica and Vodafone.

From the analysis of the tests carried out in the field and in the laboratory we will obtain the necessary conclusions to evaluate the suitability of your NB-IoT offer as an alternative for communication in an existing project and developed on another LPWAN technology: “Short-term solar radiation prediction” .

Key Words

LPWAN, licensed / unlicensed spectrum, LTE, NB-IoT, LTE-M, 3GPP, Vodafone, Telefónica, LoRaWAN.

Índice

Agradecimientos	3
Resumen	5
Abstract	6
1. Introducción	
1.1. Motivación	10
1.2. Objetivos y organización del trabajo	11
1.3. Estructura de la memoria	12
2. Estado del arte	
2.1. Redes LPWAN	13
2.2. Regulación del espectro de radio frecuencias	14
2.3. LPWAN sobre espectro no licenciado: LoRa y LoRaWAN	17
2.4. LPWAN sobre espectro licenciado: NB-IoT	18
3. Desarrollo del proyecto	
3.1. Selección de tecnologías	29
3.1.1. Hardware y entornos de desarrollo	29
3.1.2. Infraestructuras cliente/servidor	33
3.1.3. Operadoras: servicio y redes disponibles	34
3.2. Tests	
3.2.1. Definición y variables de evaluación	36
3.2.2. Programación y ejecución	39
3.3. Datos: almacén, post-procesado, paneles de resultados ...	41
4. Resultados	
4.1. Conectividad	43
4.1.1. Telefónica. Fortalezas y debilidades	43
4.1.2. Vodafone. Fortalezas y debilidades	49
4.1.3. Comparativa	53
4.1.4. Breve comparativa de latencia: NB-IoT vs LoRaWAN	53
4.2. Consumo de energía	54
4.2.1. Resultados obtenidos	56
4.2.2. Escenarios de dispositivos con batería	57
5. Aplicación	60
5.1. Proyecto “Predicción de radiación solar a corto plazo”	61
5.2. Otros casos de uso	64
6. Conclusiones	
6.1. Conclusiones y recomendaciones	65
6.2. Futuras líneas de investigación	66

Introduction

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band
Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

Motivation	67
Objectives and work organization	68
Document structure	68
Conclusions and future work	69
Glosario de Términos	70
Bibliografía	73
Anexos	75

Índice de figuras

Fig. 2.1. Relación ancho de banda / rango de alcance tecnologías de comunicación ...	14
Fig. 2.2. Relación de tecnologías LPWAN y espectro de radiofrecuencia	16
Fig. 2.3. Carrier Agregation, en detalle	20
Fig. 2.4. Características Carrier Aggregation y Dual Connectivity.....	20
Fig. 2.5. Tipos de operaciones de comunicación sobre NB-IoT	21
Fig. 2.6. Tipos de operaciones de telecomunicación sobre NB-IoT (2)	21
Fig. 2.7. Optimizaciones sobre EPS específicas para NB-IoT	22
Fig. 2.8. Esquema capas del modelo OSI	23
Fig. 2.9. Similitudes capas OSI de LTE y NB-IoT	23
Fig. 2.10. Diseño de seguridad de la comunicación	24
Fig. 2.11. Envío de mensaje de preámbulo desde UE a eNB y sincronización	25
Fig. 2.12. Flujo de mensajes para un procedimiento RACH	26
Fig. 2.13. Localización protocolo UDP en esquema OSI	26
Fig. 2.14. Longitud máxima de payload. Comparativa tecnologías LPWAN	27
Fig. 3.1. Componentes placa Pycom GPY	30
Fig. 3.2. Componentes placa de expansión Pysense de Pycom	31
Fig. 3.3. Componentes placa de desarrollo SODAQ	32
Fig. 3.4. Instalación pymakr en IDE Atom	33
Fig. 3.5. Movistar Kite Platform	34
Fig. 3.6. Movistar M2M soporte técnico	35
Fig. 3.7. Vodafone M2M. Plataforma administración SIMs	35
Fig. 3.8. Entorno de laboratorio en proceso de test, UCM Facultad de Físicas	39
Fig. 3.9. Detalle envío UDP paquete de 50 bytes	41
Fig. 4.1. Enlace a red Vodafone en sótano -1	48
Fig. 4.2. Secuencia de “Not attachment” a la red de Telefónica desde sótano -1	52
Fig. 4.3. Comparativa latencias Vodafone vs Telefónica	53
Fig. 4.4. DC Power Analyzer utilizado en los test	54
Fig. 4.5. Consumo de energía. Resultados sobre una GPY/NB-IoT de Vodafone	55
Fig. 4.6. Escenarios de baterías. Resultados sobre una GPY/NB-IoT de Vodafone	59
Fig. 5.1. Prototipo Radiación Solar UCM	62
Fig. A.1. Envío máximo permitido para UDP: 1.600 bytes	75
Fig. A.2. Conexión GPY y Raspberry	76
Fig. A.3. Envío de información entre RPi y GPY, vía puerto serie	77
Fig. A.4. Previsión de cuota de mercado para tecnologías LPWAN en 2025	78
Fig. A.5. Espacio de radio frecuencias: UHF en la banda de los 700 a 3 Ghz	78
Fig. A.6. NB-IoT, bandas de frecuencia fijadas por 3GPP	79
Fig. A.7. LoRaWAN, bandas de frecuencia	79
Fig. A.8. Protocolos capa de aplicación para TCP y UDP	80

1. Introducción

1.1 Motivación

Fue una de mis primeras preguntas en la asignatura de Redes, Protocolos e Interfases del Master IoT: “*¿Veremos soluciones LPWAN del espectro licenciado, tipo NB-IoT?*”.

Aunque negativa, la respuesta razonada de Nacho Gómez me enfocó tempranamente a aportar todo lo necesario para que, dentro de mis posibilidades, esta asignatura contara con información práctica sobre una tecnología tan novedosa como NB-IoT.

El temario desarrolló en detalle las principales tecnologías Wireless en el campo IoT para el espectro de frecuencia libre. Tanto las PAN (*Personal Area Network*) como WAN (*Wide Area Network*) nos daban una idea del amplio abanico de posibilidades para desarrollar conectividades y arquitecturas de futuros proyectos.

Pero, a la vez que se demostraban sus virtudes, se evidenciaron limitaciones en aspectos de interferencias, seguridad, calidad de servicio o latencia.

Personalmente, echaba en falta una solución más robusta para casos de uso en sectores industriales, en los que 6LowPan o LoRaWAN evidencian sus carencias. Tal es el caso del control de infraestructuras en entornos de poca cobertura, como contadores de agua o gas, denominados proyectos de *metering*, o localización de elementos de transporte, como vagones o remolques, en áreas rurales.

La reciente estandarización en 2017 de 3GPP para NB-IoT abría una gran alternativa en el espectro licenciado, añadiendo a las ventajas como el bajo coste de los componentes y el bajo consumo, otras derivadas del hecho de ser soportadas por el servicio e infraestructuras propias de las compañías de telecomunicación ya implantadas a nivel internacional: amplia cobertura, calidad de las transmisiones y seguridad de la red.

Sin embargo, acceder a una tecnología tan reciente era complicado para un proyecto docente, debido principalmente a que los equipos comerciales y técnicos de las operadoras fijan actualmente sus esfuerzos en proyectos con clientes.

Así mismo, realizar un análisis de NB-IoT sobre pruebas reales en situaciones y localizaciones diversas, fuera de los laboratorios de las operadoras, para demostrar si su oferta comercial se corresponde con una realidad técnica, se convirtió en un reto interesante dentro del enfoque del TFM.

A diferencia de los análisis de alternativas en el espectro no licenciado, donde el investigador tiene una marcada autonomía respecto a los medios y redes de comunicación, este estudio ha requerido una comunicación fluida y sincera con las dos compañías telefónicas que nos han dado acceso a su red NB-IoT: Telefónica y Vodafone.

Mi situación profesional, en la que desarrollo proyectos IoT para clientes de diferentes sectores industriales, ha sido tanto un elemento motivador como una variable ventajosa a la hora de captar la atención de estas dos operadoras, cuyos equipos humanos siempre me han dispensado un apoyo desinteresado.

1.2 Objetivos y organización del trabajo

El objetivo principal del proyecto es conocer el estado de madurez de la tecnología de comunicación celular NB-IoT, englobada en las soluciones para redes LPWA, y para la que existen pocas referencias de proyectos reales en el momento de abordar el TFM.

El trabajo parte de una exposición teórica en la que se describen las bases técnicas que soportan NB-IoT, su situación dentro del espectro licenciado de radiofrecuencias, así como su relación con otras tecnologías de espectro no licenciado.

Dado que el propósito principal es observar su comportamiento en casos de test reales, tras la descripción técnica, se identifican los elementos de hardware y software necesarios para llevar a cabo los envíos de datos entre un nodo-IoT (Pycom) y un servidor en la nube (Microsoft Azure).

A continuación, se definen las variables principales que serán objeto del análisis, la composición de los envíos, las características de estos, el almacén de los logs de resultados, así como los paneles de gráficas que completan el estudio.

Realizado el inventario técnico, se abordó el contacto con las operadoras telefónicas para solicitar acceso a su tecnología celular. Tanto Telefónica como Vodafone proporcionaron al proyecto las tarjetas de conectividad a su red NB-IoT y los usuarios de acceso a sus plataformas de gestión del servicio.

En el momento en que hardware, software e infraestructuras estuvieron operativas, se iniciaron las pruebas de campo en diferentes ubicaciones geográficas dentro del área metropolitana de Madrid, principalmente en interiores, ya que son estos espacios los que caracterizan rendimientos diferenciadores para este tipo de tecnología.

La experiencia práctica del proyecto aportó el conocimiento suficiente para describir la implantación de NB-IoT en un proyecto IoT en el que, actualmente, se utiliza LoRa como tecnología de comunicación: “Predicción de radiación solar a corto plazo” [26].

Finalmente, se presentan una serie de conclusiones sobre a la idoneidad de uso de NB-IoT en proyectos de Internet de las Cosas y, siempre en base a la experimentación llevada a cabo, se valora cuál de las operadoras tendría una situación de partida más ventajosa para acompañarnos en dichos proyectos.

1.3 Estructura de la memoria

En sus primeros capítulos, con un enfoque teórico, se detallan las características técnicas de NB-IoT, su encaje y relación con otras alternativas del esquema de radio frecuencias, así como el horizonte de alternativas LPWAN donde convive y puede coexistir como solución IoT.

Tras conocer los aspectos técnicos y normativos, los siguientes capítulos se centran en la parte práctica del TFM: la descripción de los medios físicos y lógicos utilizados, las variables a observar en los procesos de test, así como la descripción de los desarrollos realizados para llevarlos a cabo.

Finalmente, se exponen los resultados y comparativas de las pruebas, su análisis y conclusiones.

2. Estado del arte

En los últimos años, ha sido creciente el desarrollo de tecnologías inalámbricas aplicadas a redes para áreas extensas. Este tipo de redes, conocidas como WAN (*wide area network*) suponen la base de gran parte de arquitecturas en proyectos IoT.

Dentro de la amplia gama de tecnologías de comunicación inalámbricas aplicables a las redes WAN, en este estudio nos centraremos en las características teóricas y prácticas de una de ellas: NB-IoT.

Para ello, conviene conocer el modelo de una tipología de red WAN sobre la que mejor se aplican las soluciones IoT en situaciones de conectividad inalámbrica: las redes LPWAN.

Del mismo modo, y para enmarcar en el contexto adecuado a NB-IoT como tecnología alternativa en el proyecto “Predicción de radiación solar a corto plazo”, desglosaremos brevemente los aspectos técnicos de LoRa (LoraWAN), ya que actualmente es ésta la utilizada en dicho proyecto.

2.1. Redes LPWAN

La comunicación entre los nodos de las redes inalámbricas se realiza por medio de ondas portadoras de radio, transmitidas a diferentes frecuencias.

Por las características técnicas de esta comunicación, principalmente por su rango de cobertura, podemos definir dos grandes tipologías de las redes WAN: de corta distancia (WPAN, WLAN) y de larga distancia (LPWAN).

- WPAN – Personal Area Network
Redes que cubren un área mínima, la mayoría de las veces soportada sobre tecnología Bluetooth.
- WLAN – Wireless Local Area Network
Utilizan la tecnología **Wi-Fi**, para la que los estándares 802.11a y 802.11g fijan la utilización de la banda de 2,4-2,5 Ghz. En Europa, la ETSI ha definido 13 canales para los equipos Wi-Fi. En España, se pueden utilizar 4 canales no-adyacentes (1, 5, 9 y 13).
- LPWAN – Bajo consumo, larga distancia, bajo ancho de banda (menos datos, mayor distancia)

Formular un equilibrio entre el bajo consumo, los costes reducidos y el rango de cobertura, se convierte en el ejercicio más importante a la hora de elegir una de ellas para nuestros proyectos IoT.

En esta clasificación, BLE, ZigBee, Wi-Fi y 6LowPAN ofrecen un rango reducido de cobertura, siendo empleados en aplicaciones Smarthome o en *retail*. Se englobarían en las WLAN y/o WPAN.

NB-IoT, LoRa, LTE-M o Sigfox se aventajan en aportar una gran cobertura y un bajo consumo de energía a la red que las implementa. Quedan, por tanto, enmarcadas en las denominadas LPWAN, acrónimo de *Low-Power/Wide-Area Networks*.

Las redes LPWAN, cuya denominación ni tan siquiera existía en 2015, han experimentado una evolución y despliegue notables. Son redes que permiten diseños de red con un elevado número de nodos, con reducidos costes en sus componentes y una amplia comunidad de desarrolladores, lo que las sitúa hoy en un nivel de madurez incuestionable en contextos IoT de diversa índole.

Por sus características, las redes LPWAN se ajustan perfectamente a los requerimientos actuales de IoT, experimentando un rápido crecimiento tanto en las tecnologías desarrolladas sobre el espectro licenciado como en el no licenciado.

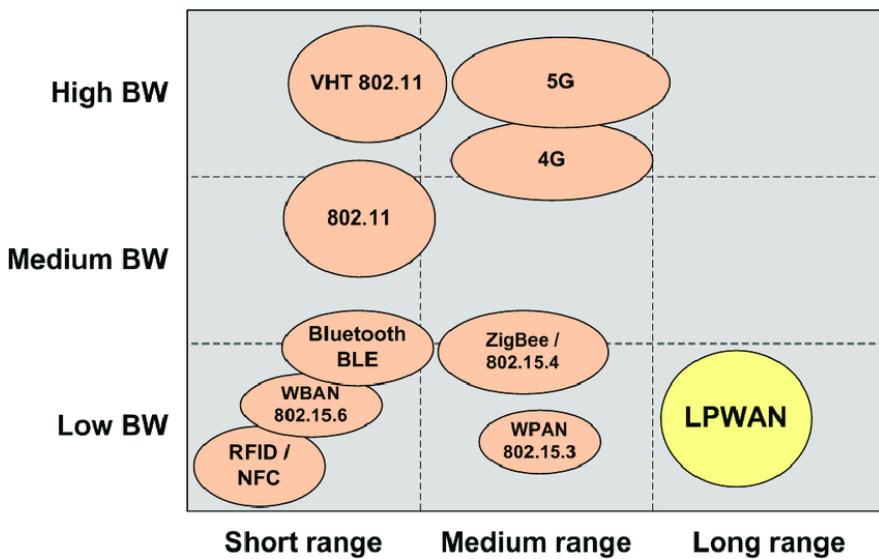


Fig. 2.1. Relación ancho de banda / rango de alcance.
(fuente.: https://www.researchgate.net/figure/Localization-of-LPWAN-technologies-according-to-range-capability-and-bandwidth-required_fig1_322223966)

2.2. Regulación del espectro

Hemos comentado que la comunicación entre los elementos de una red inalámbrica se realiza mediante ondas de radio. Esta transmisión se canaliza a través del espectro radioeléctrico en el que conviven señales de radio, televisión, telefonía, etc.

En el espectro radioeléctrico español, como parte del espectro de frecuencias electromagnéticas, confluyen actualmente gran cantidad de servicios de comunicación, siendo un medio imprescindible para el desarrollo de todos los ámbitos de la sociedad digital.

Dada esta confluencia, y con el objeto de aportar seguridad, evitar interferencias y ordenar su utilización, toda emisión de información en el espectro radioeléctrico está gobernada por una serie de entidades reguladoras, nacionales e internacionales, que acuerdan y fijan sus rangos de frecuencia, así como los diferentes servicios a los que cada banda estará asignada.

Algunos de ellos son:

- Sistemas de comunicaciones móviles
- Redes inalámbricas
- Televisión
- Radio AM y FM
- Sistemas de comunicación y navegación por satélite
- Radares y sistemas meteorológicos y militares
- Navegación y control aeronáutico
- Sistemas de transporte inteligentes
- Sistemas de domótica
- Radares de vehículos
- Alarmas, etc.

En España, la asignación de bandas de frecuencia del espectro a los distintos servicios que las demandan se realiza mediante un instrumento legal, el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF^[1]), dependiente del Ministerio de Economía y Empresa. En el CNAF también se especifica un marco técnico para los diferentes usos del espectro.

En la web del Ministerio se especifican las funciones asociadas al Cuadro Nacional de Atribución de Radiofrecuencias:

“El CNAF traspone al ordenamiento legal español los cambios y modificaciones de atribución de bandas de frecuencia y servicios radioeléctricos derivados de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones, de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), así como las Decisiones de la Comisión Europea, que España como Estado miembro, tiene la obligación de adoptar.”⁽¹⁾

Las empresas que solicitan bandas del espectro para su uso exclusivo se someten a un concurso público de asignación o subasta, regulado por la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT), que supone un pago al Estado por la concesión temporal y la explotación comercial.

Este espectro, de uso particular para aquellas concesiones a las operadoras telefónicas, es el denominado “espectro licenciado”. Entre sus ventajas está el hecho de que puede ser utilizado más eficientemente, dado que el operador puede ejercer mayor flexibilidad a la hora de gestionar la calidad de su servicio mediante su propia estrategia de despliegue de su red. Las estaciones base, a las que también nos referiremos como “antenas” o “celdas”, pueden ser repartidas según sus criterios técnicos y de negocio, lo que permite una gestión empresarial de la inversión realizada.

La elevada demanda actual, impulsada por un mercado ávido de soluciones IoT, M2M (*machine to machine*) e IIoT (*industrial internet of things*), sumada a la reserva de frecuencias que supone el futuro 5G, han provocado que en 2019 esté ocupada la práctica totalidad del espacio de radio disponible para redes de telefonía móvil.

Más allá del regulador de cada país, la coordinación internacional necesaria para unificar criterios de uso y nomenclatura del espectro de bandas de radiofrecuencia es determinado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), con sede en Ginebra .

Este organismo intergubernamental, nacido en 1865 para regular las primeras redes de telégrafos, gestiona actualmente el reparto del espectro de frecuencias radioeléctricas.

Siendo organismo especializado de la ONU desde 1947, ha sido responsable de organizar mediante las denominadas “Recomendaciones”, la normativa y los estándares de los desarrollos de la radio, el teléfono, las comunicaciones vía satélite, etc.

Como vemos, el espectro radioeléctrico, denominado “espectro licenciado”, está fuertemente supervisado y reglamentado, algo necesario para ordenar intereses con necesidades de la actual sociedad digital.

Si bien es necesaria, esta estricta reglamentación, así como el coste económico que supone, impediría competir contra las grandes operadoras a iniciativas tecnológicas más modestas en nivel de inversión, de no ser por la disposición de una banda de frecuencias públicas de acceso libre o “espectro no licenciado”, donde muchas tecnologías con denominación LPWAN han encontrado un entorno de desarrollo.

	SIGFOX	LoRa	clean slate	NB LTE-M Rel. 13	LTE-M Rel. 12/13	EC-GSM Rel. 13	5G (targets)
	 SIGFOX	 LoRa		 NB LTE-M Rel. 13	 LTE-M Rel. 12/13	 EC-GSM Rel. 13	 5G
Range (outdoor) MCL	<13 km 160 dB	<11 km 157 dB	<15 km 164 dB	<15 km 164 dB	<11 km 156 dB	<15 km 164 dB	<15 km 164 dB
Spectrum Bandwidth	Unlicensed 900 MHz 100 Hz	Unlicensed 900 MHz <500 kHz	Licensed 7-900 MHz 200 kHz or dedicated	Licensed 7-900 MHz 200 kHz or shared	Licensed 7-900 MHz 1.4 MHz or shared	Licensed 8-900 MHz 2.4 MHz or shared	Licensed 7-9000 MHz shared
Data rate	<100 bps	<10 kbps	<50 kbps	<150 kbps	<1 Mbps	10 kbps	<1 Mbps
Battery life	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years
Availability	Today	Today	2016	2016	2016	2016	beyond 2020

Fig. 2.2. Relación de tecnologías LPWAN y espectro de radiofrecuencia en el que operan
(fuente. <http://micm.es/noticias/iot-el-internet-de-las-cosas/>)

A continuación, se detallan las características de las principales tecnologías de conectividad en redes LPWAN, resumidas en la figura 2.2., tanto para las frecuencias licenciadas como para las no licenciadas del espectro radioeléctrico.

2.3. LPWAN sobre el espectro no licenciado: LoRa y LoRaWAN

Dado su interés público, siendo un elemento tan relevante en el desarrollo de soluciones tecnológicas IoT y con el ánimo de dar cabida a necesidades de desarrollo más económicas y locales, todos los países contemplan un espacio del espectro para uso público, donde no es necesario identificar ante el regulador los accesos y usos.

Este espacio es el denominado “espectro no licenciado” que, como indica la figura A.5, comprende diferentes bandas de frecuencias, siendo la asignada en Europa la comprendida entre los 862Mhz y los 870Mhz [12][17].

Al tratarse de un espacio libre, el uso de la banda pública no requiere de permisos gubernamentales, tampoco de la intermediación del servicio de acceso de una operadora telefónica, aunque como anticipamos, tanto fabricantes como usuarios deben ajustarse a unas reglas de explotación y pautas de transmisión básicas que permitan un reparto equitativo del ancho de banda, fijadas por el organismo regulador.

Entre éstas, la más importante es el máximo de transmisiones que el dispositivo emisor puede realizar al día: en este espectro de frecuencias sólo se permite usar con un *duty cycle < 1%* (fracción de tiempo en la que una señal de radio está activa).

Las radiofrecuencias en espectro no licenciado son, por naturaleza, muy vulnerables a interferencias. Gestionar dichas interferencias es más complicado por la diversidad y descoordinación que provoca un segmento de telecomunicaciones con escasa supervisión.

A pesar de ello, y en gran parte debido a su bajo consumo, larga distancia de transmisión y precios moderados de los componentes, LPWAN ha ido ganando popularidad tanto en las comunidades de investigación como en el campo industrial, tanto en proyectos para infraestructuras interiores como en exteriores.

El rango de conectividad se fija, dependiendo de cada solución, entre 10 y 40 km para áreas rurales, y de 1 a 5 km en zonas urbanas.

El eficiente consumo de energía permite contemplar escenarios de baterías de diez años de vida sin recarga, y un precio muy asequible de sus chips de radio, por debajo de los 2€.

Por todo ellos, el retraso de las operadoras en liberar una tecnología LPWAN en sus infraestructuras celulares, la actividad de las comunidades “maker” y la bajada en el precio del hardware, convirtieron a protocolos como LoRaWAN o Sigfox en las opciones más utilizadas en el diseño de este tipo de redes.

LoRa es un sistema propietario de la empresa Semtechs, que posee su propio esquema de modulación de señal de radio, manipulando la onda de radio-frecuencia para codificar y decodificar información.

La modulación que realiza LoRa se basa en una ya existente desde los años 40, denominada CSS (Chirp Spread Spectrum), y que gestiona el flujo de información dentro de un ancho de banda fijo [16]. CSS tuvo un primer uso militar, debido a su robustez frente a interferencias y a la larga distancia que admitían sus comunicaciones.

LoRa resultó ser la primera aplicación comercial de bajo coste sobre CSS, siendo su nombre asignado precisamente por las características de largo alcance (“*long-range*”).

Basándose en el sistema de modulación de señal diseñado por LoRa en la capa física, LoRaWAN es una implementación de la capa MAC (Media Access Control) para dar soporte a LoRa.

Apoyada por una fuerte comunidad de desarrolladores, y asociada con un interesante planteamiento de “acceso libre a Internet”, LoRaWAN es una de las tecnologías emergentes LPWAN que ha tomado mayor relevancia en el horizonte de proyectos IoT, en los que se opera en espectro no licenciado, emitiendo en la frecuencia de 868 Mhz [17].

LoRaWAN aplica una técnica de modulación adaptativa que requiere un modem multicanal en el Gateway de enlace, encargado de recibir los mensajes emitidos por los diferentes canales. El espectro expandido (*spread spectrum*) provee una separación óptima entre las señales utilizando un factor de expansión (*spreading factor*) en cada señal individual.

2.4. LPWAN sobre espectro licenciado: NB-IoT

NB-IoT, acrónimo de *Narrow-band IoT*, es el estándar para tecnología inalámbrica en redes LPWAN para el que existe una definición de 3GPP (*3rd generation partnership project*) desde junio de 2016.

Hasta ese momento, la mayor parte de iniciativas sobre redes LPWAN se realizaba con tecnologías de comunicación desde el espectro no licenciado de radio-frecuencias, descrito en puntos anteriores.

La necesidad de adaptar su red de telecomunicaciones celulares, básicamente modificando el software de sus antenas, así como de dar forma a un servicio que se acomodase a su estructura comercial, exigió a las operadoras de telefonía un plazo de tiempo mayor para estar preparadas para competir con otras soluciones LPWAN, como LoRa o Sigfox.

Siguiendo las premisas técnicas que confiere su relación con las redes LPWAN, NB-IoT se ha enfocado a proporcionar conectividad de largo alcance y un bajo consumo de energía.

Como veremos, el hecho de desarrollarse sobre una tecnología como LTE, ya desplegada por las operadoras telefónicas, y sobre el espectro licenciado de frecuencias, supone un aprovechamiento de capacidades de la red que descargan al dispositivo de complejidad, tanto de hardware como de software. Esto redunda en mejores coberturas, ahorro de costes y bajos consumos de energía que posicionan a NB-IoT como una gran opción en proyectos IoT.

NB-IoT. Características técnicas.

Al ser una tecnología móvil sobre espectro licenciado, NB-IoT emite en la banda ISM de frecuencias entre los 790Mhz y 862Mhz [17].

Aunque es una tecnología que deriva de la propia especificación LTE, la versión 13 de 3GPP que desarrolla el estándar NB-IoT se enfocó a mantener su interfaz de comunicaciones lo más simple posible, con la intención de reducir costes de producción de los dispositivos y minimizar consumos de batería.

En este sentido, se han eliminado muchas características propias de LTE, de necesidad para servicios de voz pero que para el mundo de Internet de las Cosas no son imprescindibles:

- Handover

Un proceso fundamental a la hora de asegurar la calidad de servicio (QoS) en las comunicaciones celulares, que proporciona un traspase de celda durante la llamada sin que el usuario pierda la conexión en las ocasiones de bajas condiciones en algunos de los parámetros de la llamada: potencia, tráfico, calidad del canal, etc.

Al eliminar esta característica de su implementación, NB-IoT no permite la reconexión automática entre celdas mientras el dispositivo se encuentra en modo “conectado”. Esto supone que el dispositivo sólo puede seleccionar y conectarse a otra celda cuando su estado es “desactivado”.

Con esta restricción, NB-IoT está más enfocado a dispositivos que transmitan datos sin grandes desplazamientos geográficos, con ubicación lo más estable posible.

- Indicadores de seguimiento de la calidad del canal.

Conocidos como informes CQI (Channel Quality Indication), es un tipo de información enviada en el canal de estado que permite valorar la probabilidad de que un bloque de transmisión contenga errores por encima de los límites de calidad fijados.

- Agregación de portadoras. (Carrier Aggregation).
Tecnología consistente en combinar dos o más señales u ondas portadoras de datos en un mismo canal para mejorar su aprovechamiento (ver fig. 2.3).

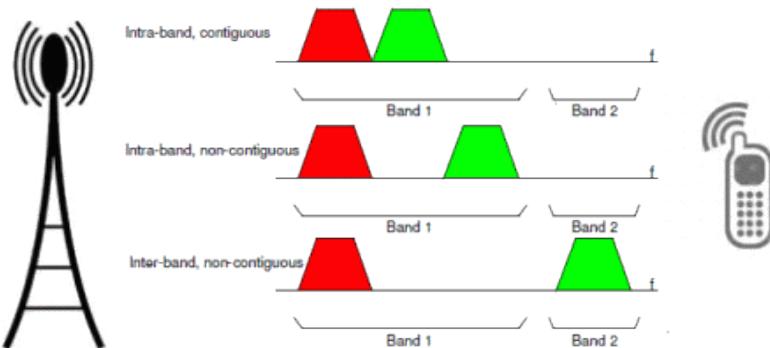


Fig. 2.3. Carrier Aggregation, en detalle
(fuente.: <http://www.telecomabc.com/c/carrier-aggregation.html>)

- Conectividad dual (LTE Dual Connectivity).
Con el mismo objetivo que la Carrier Aggregation, Dual Connectivity se enfoca a transmitir y recibir datos desde múltiples portadoras, en este caso desde dos grupos de celdas: una máster y otra secundaria (ver fig. 2.4).

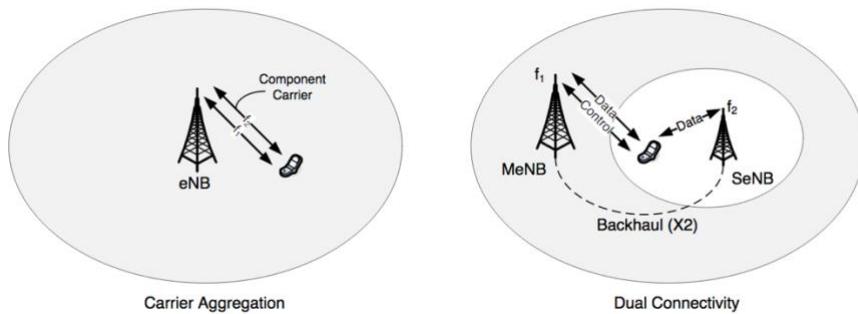


Fig 2.4. Características Carrier Agregation y Dual Connectivity
(fuente.: https://www.its.blrdoc.gov/media/66437/ratasuk_isart2017.pdf)

Liberado de estas características, NB-IoT convive con las comunicaciones LTE ocupando un ancho de banda de 200 Khz, que se corresponde con un bloque de información de GSM o de LTE, lo que permite gestionar un elevado número de dispositivos desde la misma celda (100.000 por celda y portadora).

En esta selección de banda de frecuencias, NB-IoT puede realizar tres tipos de operaciones, representadas en las figuras 2.5 y 2.6:

- Operaciones *in-band* (), utilizando los bloques de información dentro de la onda portadora LTE.
- Operaciones *guard-band* (), utilizando los bloques de información sin uso en las bandas de transporte *guard-band* de LTE.
- Operaciones *stand-alone* (), donde se podrían utilizar las bandas de frecuencia de GSM actualmente en uso.

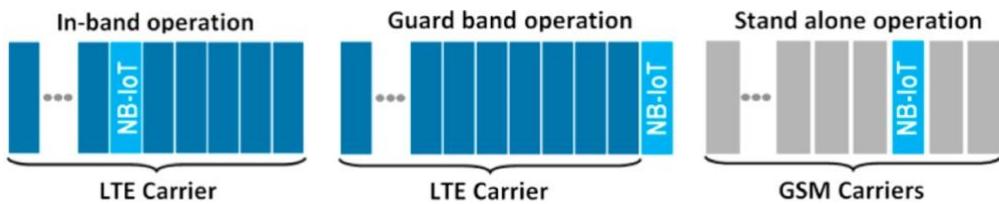


Fig. 2.5. Tipos de operaciones de telecomunicación sobre NB-IoT (1)
(fuente: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma296/1MA296_2e_NB-IoT_Measurements.pdf)

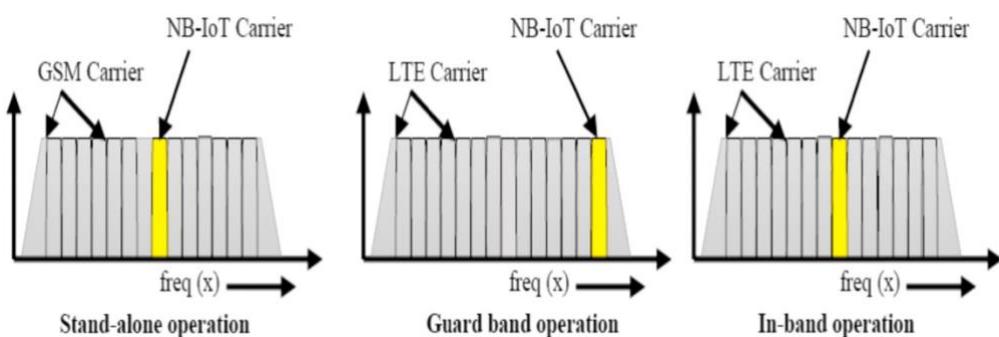


Fig. 2.6. Tipos de operaciones de telecomunicación sobre NB-IoT (2)
(fuente: https://www.researchgate.net/figure/NB-IoT-operation-mode-6-7_fig4_315505158)

Arquitectura de Red.

La arquitectura de red de NB-IoT está basada en el sistema EPS (Evolved Packet System), redefinido por 3GPP como una evolución en la gestión de las comunicaciones móviles para LTE a partir de la anterior especificación de 3G.

Sobre EPS, se desarrollaron para NB-IoT dos optimizaciones específicamente enfocadas a IoT Celular (*Cellular IoT – CiOT*): la de esquema de usuario y la de esquema de control (ver figura 2.7).

Ambas buscan el camino más óptimo para el control de envío y recepción de paquetes de datos. Esta “ruta óptima” para el esquema CiOT EPS es flexible para cada paquete de datos generado.

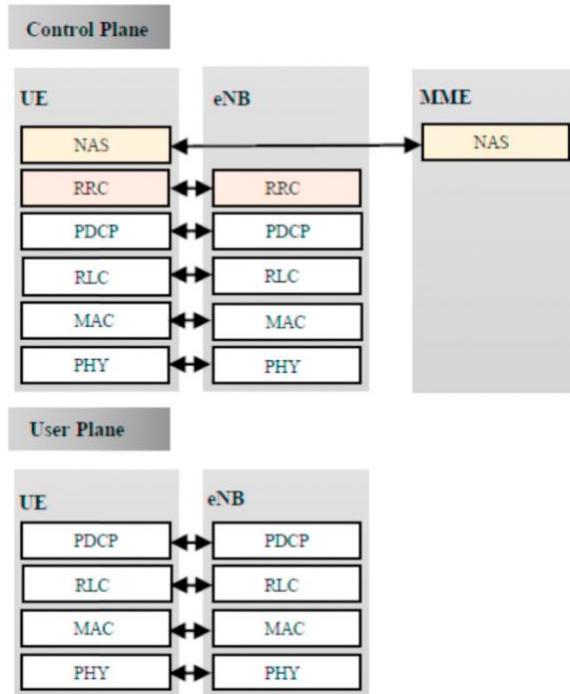


Fig. 2.7. Optimizaciones sobre EPS específicas. Pila de protocolo de NB-IoT para planos de Control y Usuario. (fuente: “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT” [20])

Con estas optimizaciones en los esquemas de control, el acceso de un usuario NB-IoT a una celda se realiza de forma similar a como se hace desde LTE. En la optimización del esquema de control (CIoT EPS), el acceso a la red por UMTS (denominado E-UTRAN, *evolved UMTS terrestrial radio access network*) gestiona las comunicaciones de radio entre un equipo (User Equipment, UE) y una Entidad Gestora de Movilidad (MME), incluyendo las denominadas “estaciones base evolucionadas”: eNodeB y eNB.

La información es enviada a través de un Gateway (Serving GW), teniendo diferente tratamiento si es una comunicación IP o No-IP

En resumen, NB-IoT reutiliza la existente arquitectura de red E-UTRAN, así como toda la instalación de gestión de datos de LTE. Esto marca una importante diferencia con LoRaWAN, que posee una arquitectura de red más sencilla, pero donde la gestión de la red de servidores es más compleja. De esta forma, al basarse en las funcionalidades de la celda y quedar liberado de muchos de los procesos de control innecesarios para IoT, los dispositivos NB-IoT consiguen economizar tanto en componentes como en consumos de energía.

Protocolos capa Enlace

La pila de protocolo en la capa de enlace del modelo OSI para NB-IoT es prácticamente la misma que la definida para LTE, reducida y optimizada para enlazar

en zonas de servicio sin uso de la propia LTE, para lo que se han eliminado algunos componentes más enfocados a movilidad que a IoT (fig. 2.8).

De esta forma, la pila de protocolo en esta capa de enlace puede considerarse como una nueva interfaz de radio (*air interface*) construida sobre la sólida infraestructura LTE, aportando nuevas características al enlace físico entre el dispositivo y la red.

Estas infraestructuras desplegadas para LTE son las que posibilitan a NB-IoT una conexión de más de 100.000 dispositivos por celda, con una escalabilidad disponible sólo con añadir más portadoras a la propia celda.

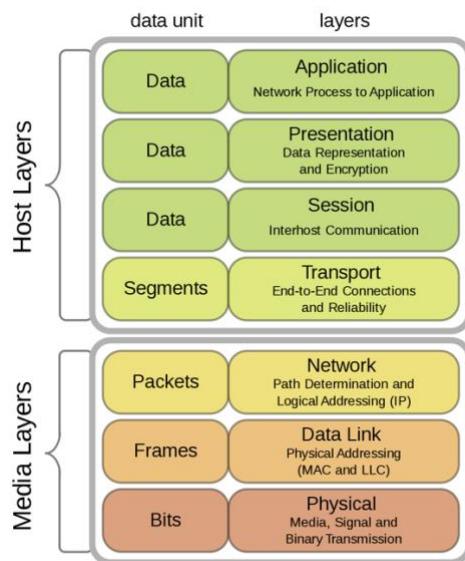


Fig. 2.8. Esquema capas del modelo OSI (https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_OSI)

En su optimización, ya hemos hablado sobre cómo la estructura del protocolo de NB-IoT quedaba dividida entre el plano de control y el plano de usuario. Como se indica en la figura 2.9, hasta llegar al Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *packet data convergence protocol*), los elementos de la pila son los mismos que los utilizados por LTE.

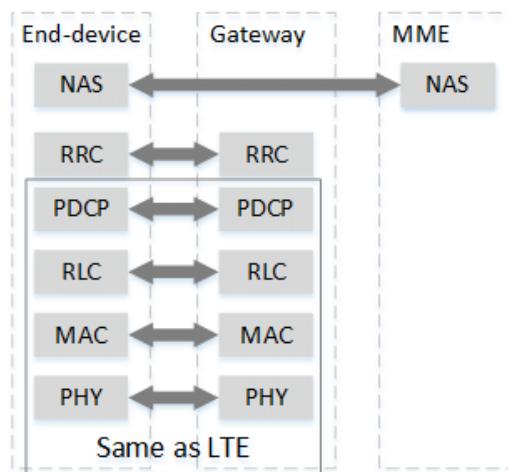


Fig. 2.9. Similitudes capas de protocolo de LTE y NB-IoT
 (fuente: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/s1-interface>)

El PDCP se enmarca, tanto en las especificaciones como en estudios técnicos, en un tamaño máximo de 1.600 bytes, hecho que en nuestros tests **hemos podido comprobar** y validar (Anexos 1).

El NAS (*non-access stratum*) comunica las señales que no son de radio entre el UE (en la imagen denominado como *End-device*) y el núcleo de la red. Realiza los procesos de autenticación del dispositivo a la red, los controles de seguridad y la gestión de las portadoras de datos que confluyen en una misma banda.

Vemos en la figura 2.10 cómo debajo del NAS existe una capa denominada “Estrato de Acceso” (AS, *Access stratum*), encargada de gestionar los recursos de radio NB-IoT entre el UE (*user equipment*) y la red de radio. Ésta se apoya en las funciones de control de recursos de radio desempeñadas por el protocolo RRC.

RRC se implementa en el nivel IP y sus mensajes son transportados entre el dispositivo y el eNB vía protocolo PDCP.

La seguridad en la comunicación del NAS, así como la autenticación entre la UE y la red es proporcionada desde la capa 2 (*Data Link Layer* del modelo OSI, figura 2.8), encargada de mantener la transmisión inalámbrica entre el usuario y la red. Es esta misma capa la que organiza la forma en que múltiples usuarios acceden a los recursos de la red y encripta los datos transmitidos.

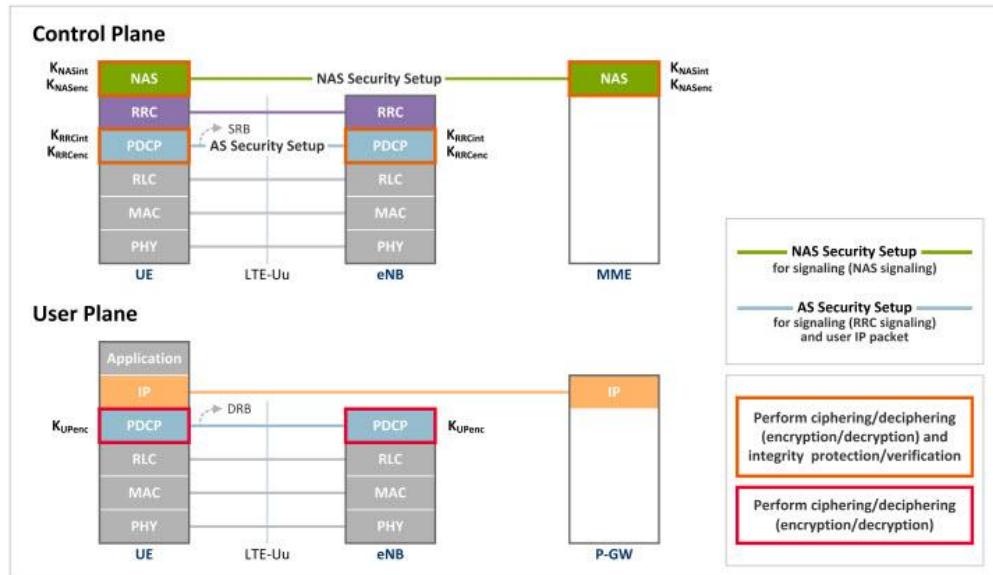


Fig. 2.10. Diseño de seguridad de la comunicación
 (fte. <https://www.netmanias.com/en/post/techdocs/5903/lte-security/lte-security-ii-nas-and-as-security>)

Para proporcionar una conexión fiable en una cobertura extendida, NB-IoT aplica un esquema repetitivo de transmisión sobre el protocolo RACH (Random Access Channel). Este procedimiento se inicia y repite con una comunicación denominada “preámbulo de transmisión”.

Podemos observar un esquema de los pasos seguidos en el procedimiento de inicio de comunicación en las figuras 2.11 y 2.12.

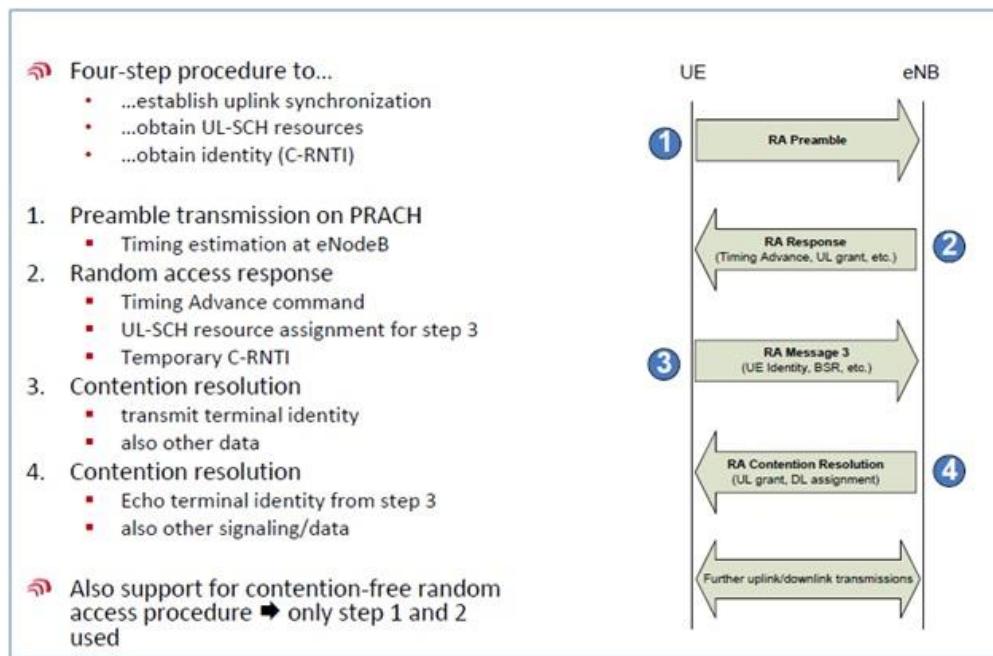


Fig. 2.11. Envío de mensaje de preámbulo desde UE a eNB y sincronización con Uplink (fte. <http://ue-ul-sync.blogspot.com/2013/05/ue-uplink-synchronization.html>)

Si el preámbulo de transmisión falla, la UE retransmitirá sucesivamente el mismo preámbulo hasta que el número de retransmisiones alcance un número máximo o se establezca la conexión.

Cuando el eNB recibe satisfactoriamente el preámbulo, éste mismo enviará la respuesta de acceso aleatorio a la UE.

Por ultimo, el procedimiento RACH se completa con un mensaje a la UE enfocado a iniciar el último mecanismo de sincronización y enlace del canal, denominado “contention resolution”, que dará paso a la transmisión de la información.

Aunque a primera vista NB-IoT tiene un procedimiento de RACH similar al de LTE, existen algunas diferencias entre ellas:

- La generación del preámbulo en LTE está basada en código, mientras que en NB-IoT es sólo una señal de sub-portadora.
- NB-IoT está basado en el nivel CE.
- Como hemos visto, NB-IoT depende del procedimiento de acceso aleatorio (RACH) dado que, a diferencia de LTE, no tiene recursos de radio dedicados para realizar peticiones.

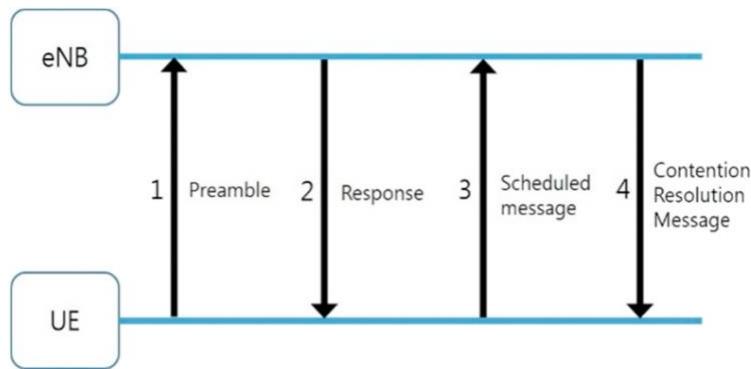


Fig. 2.12. Flujo de mensajes para un procedimiento RACH
(fte. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128038017000055>)

Protocolo capa de Transporte: UDP

Ascendiendo en el modelo OSI descrito en la figura 2.8, acabamos de explicar cómo se desarrollan los protocolos NB-IoT en sus tres primeras capas: Física, Enlace y Red.

En este epígrafe se explica el diseño de la tecnología NB-IoT en las capas superiores, desarrolladas sobre Internet Protocol de la capa de Red (fig. 2.13).

Conocido por sus siglas, *User Datagram Protocol* es un protocolo de comunicación de la capa de Transporte desarrollado sobre el protocolo de Internet de la capa de Red (IP).

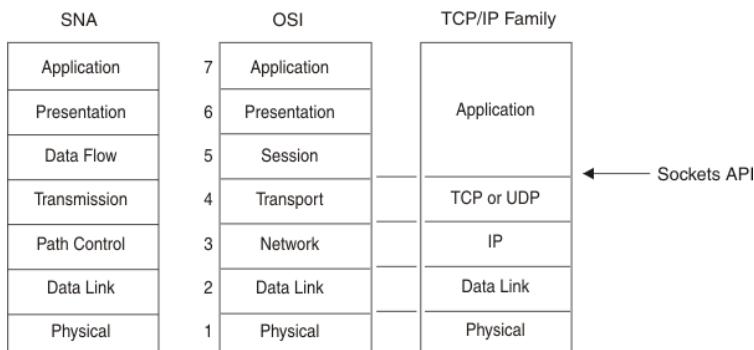


Fig. 2.13. Localización protocolo UDP en esquema OSI

A diferencia del TCP (Transmission Control Protocol), donde prima el control de la entrega de los envíos realizados entre dos ordenadores, en el protocolo UDP no se asegura la fiabilidad de dicha entrega.

De este hecho se derivan una serie de características que hacen de UDP un protocolo muy utilizado en soluciones en las que el dato perdido no supone un impacto en el resultado del conjunto transmitido.

Liberado de la complejidad que supone el control de los envíos implementado por TCP, que suponen una carga de procesamiento, tiempo y consumo de energía, UDP

se convierte en una interfase de datos entre los procesos que corren en la capa de aplicación y las capacidades de la capa IP.

De forma sencilla, UDP transmite a través de un puerto definido en ambas máquinas, tomando el dato de la capa de aplicación, empaquetándola con un formato de mensaje simplificado, y enviándola a través de IP.

Si se precisa, la fiabilidad del envío debe implementarse en las capas de aplicación, por ejemplo, mediante la asignación de un identificador de secuencia de emisión que será validado en el receptor.

NB-IoT está implementado sobre el protocolo UDP de la capa de transporte. Por tanto, no puede utilizar protocolos de aplicación que se apoyan en TCP, caso del bróker de mensajes MQTT.

A cambio, puede utilizarse el protocolo CoAP, *Constrained Application Protocol* [36], diseñado para operar sobre UDP.

Longitud máxima de paquete enviado por NB-IoT

El valor de esta variable aparece en muchos de los análisis consultados para la realización de este trabajo, todas ellas relacionadas en la sección “Referencias”.

"(...) NB-IoT allows the transmission of data of up to 1600 bytes. LoRa allows a maximum of 243 bytes of data to be sent. In contrary, Sigfox proposes the lowest payload length of 12 bytes, which limits its utilization on various IoT applications that need to send large data sizes." [21]

	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	Duty cycle	Unlimited
Maximum payload length	243 bytes	1600 bytes
Range	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Low
Authentication & encryption	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station

Fig. 2.14. Longitud máxima de payload. Comparativa tecnologías LPWAN [23]

El destacado carácter práctico de este TFM ha requerido comprobar si el dato relativo a “máximo payload” en 1.600 bytes para NB-IoT, expuesto en los informes referenciados más arriba, se corresponde con la realidad.

Esta prueba está desarrollada en el primer punto del capítulo “Anexos”.

3. Desarrollo del proyecto

En este capítulo se describen los componentes de hardware analizados como alternativas para el desarrollo de las pruebas de testing de rendimiento para NB-IoT.

Si bien la fecha de creación del estándar de 3GPP para NB-IoT es relativamente reciente, la velocidad de adaptación de la industria de componentes electrónicos ha sido tal que actualmente la oferta es muy variada y con precios asequibles, lo que revierte en el ciclo de adopción y, una vez más, en el abaratamiento de costes.

El orden de presentación de los epígrafes de esta sección lo ha impuesto, principalmente, la propia secuencia con la que se realizó el proceso de selección del hardware para los procesos de laboratorio.

2.1. Selección de tecnologías

Esta sección recoge, en formato de guía, el procedimiento de instalación y pruebas del hardware de conexión utilizado para las pruebas de conectividad de NB-IoT, realizadas para los servicios de Telefónica y de Vodafone.

Con el objetivo de poder comparar los resultados, el hardware sobre el que se han desarrollado los test es el mismo para ambas operadoras: módulo Pycom GPY sobre placa de expansión Pysense.

Las SIMs solicitadas a Vodafone y Telefónica son 4FF, formato requerido por el MCU de Pycom.

Pycom monta un chip de comunicaciones Sequans, con un sistema operativo MicroPython para el microcontrolador que incorpora todas las funcionalidades que este proyecto requería, haciendo más accesible a la comunidad el desarrollo realizado.

En el proceso de evaluación de microcontroladores, también se realizaron pruebas del hardware de SODAQ, que implementa el chip SARA-R410M de uBlox. Como comentaremos a continuación, la placa SODAQ parece una solución más compacta que la de PYCOM, aunque adolece de las ventajas que esta última aportaba para los objetivos particulares de este TFM.

3.1.1. Hardware y entornos de desarrollo

La primera tarea para la ejecución práctica de este TFM consistió en averiguar cuáles eran las placas y módulos de transmisión más recientes y qué especificaciones podrían resultar más interesantes, o limitadoras, para el proyecto. Entre otras: precio y disponibilidad del producto, compatibilidad con las soluciones de las operadoras, comunidad de desarrollo y soporte técnico.

Una vez completada la selección de módulos de comunicación, se realizó la búsqueda de soluciones de fabricantes de hardware que los integrasen en sus placas de desarrollo (placas MCU).

Habitualmente, y en base a su estrategia tecnológica y comercial, los fabricantes de placas de desarrollo realizan esta integración de dos formas:

- Individual. Con módulo, antena, memoria RAM, ranura SIM y un conector USB que permite la alimentación eléctrica y la actualización del software. Este tipo de placas están fabricadas para poder conectarse con otros componentes electrónicos a través de su GPIO, formando parte de arquitecturas modulares más complejas.
- Agrupada. A los elementos del modelo Individual, se le añaden un conjunto de sensores que hacen más sencillo el prototipado rápido de soluciones IoT. Por el contrario, esta unificación de componentes condiciona el diseño de la solución y su escalabilidad futura (exceso o defecto de número de sensores, con el consumo de energía extra que supone).

Las placas de desarrollo (*development boards, MCU boards*) evaluadas han sido las siguientes:

- PYCOM
- Actualmente, son de este fabricante las placas de desarrollo con tecnología LoRaWan utilizadas para el proyecto “Predicción de Radiación solar a corto plazo”.

De su gama de productos, nos centramos en su modelo GPY, que instala un chip de comunicación diseñado para NB-IoT, LTE-M y dispone, además, de conectividad Bluetooth y WiFi.

Como en toda su gama, Pycom monta en el microcontrolador de la GPY el sistema operativo MicroPython, una versión reducida pero muy completa de la distribución original, lo que permite programarlas en el lenguaje Python y hacer uso de las principales librerías de este lenguaje.

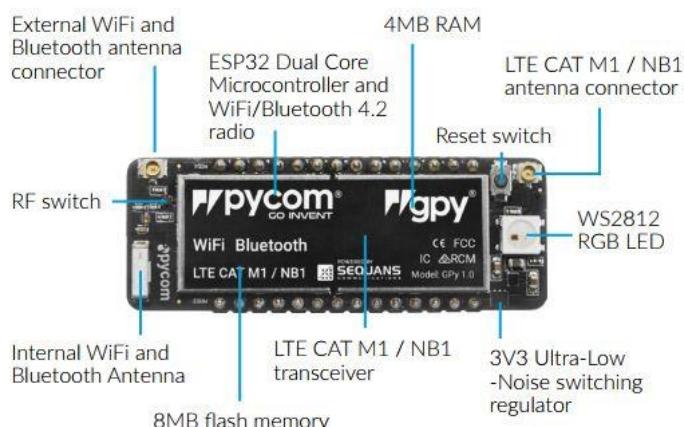


Fig. 3.1. Componentes placa Pycom GPY

La placa GPY puede tener dos funciones:

- Una concentradora, a modo de Gateway, que reciba y suba a internet los datos recogidos de una red de dispositivos y/o sensores. En este sentido, se desarrolló y testó una arquitectura conformada con una Raspberry, a modo de host multifunción, y una Pycom GPY, con funciones de Gateway hacia internet (ver Anexo, “Envío de datos entre un host y una GPY”).
- Otra como nodo IoT, acoplándose con una placa de expansión que le proporciona los sensores más comunes de forma integrada. Para esta posibilidad, Pycom proporciona otro elemento de hardware, denominado Placa de Expansión Pysense, que en un proyecto como el de “Predicción de Radiación Solar” es una solución idónea si queremos integrar en cada Nodo-IoT datos de luz ambiental, temperatura, humedad, presión barométrica, etc.

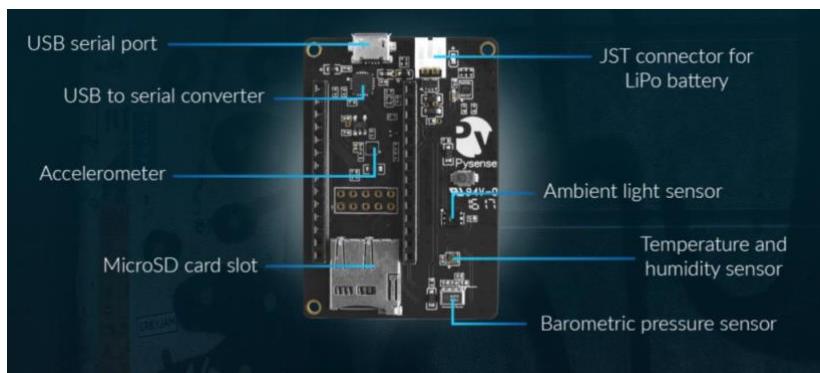


Fig. 3.2. Componentes placa de expansión Pysense de Pycom
(Fuente, <https://docs.pycom.io/datasheets/boards/pysense>)

PROS

- Además de NB-IoT y LTE-M, incorpora el chip ESP32 (WiFi y Bluetooth)
- MicroPython
- Modular, con ampliaciones a soluciones propias de la marca o a otras alternativas (ej., Raspberry)
- Precio (GPY 44€ + Pysense 25€ + Antena 9€)

CONTRAS

- Aún no homologada por las operadoras
- Actualización de Firmware laboriosa

• SODAQ

Esta es una placa que cuenta con la homologación de Vodafone para su tecnología NB-IoT. Por este motivo realizamos pruebas básicas de uso con ella, que resultaron satisfactorias: básicamente, la conexión a la red de Vodafone sin necesidad de realizar ningún desarrollo de transmisión.

La SODAQ es una placa que aúna las características de las de desarrollo y las de expansión, esto es, incorpora el microchip y el módem con una serie de sensores: humedad, presión atmosférica, acelerómetro/magnetómetro y GPS.

Además, su diseño es compatible con la plataforma de desarrollo Arduino, lo que facilita mucho los primeros pasos y enlaza con una comunidad de desarrolladores muy asentada.

Monta un MCU de uBlox SARA N2, R4 series con Módulos de transmisión Quectel BG9n (*transceiver cellular modules*). Se programa en C.

PROS

- Homologada por Vodafone
- Admite la plataforma Arduino (IDE, librerías, comunidad)
- Incorpora GPS y sensórica

CONTRAS

- Precio (95€)

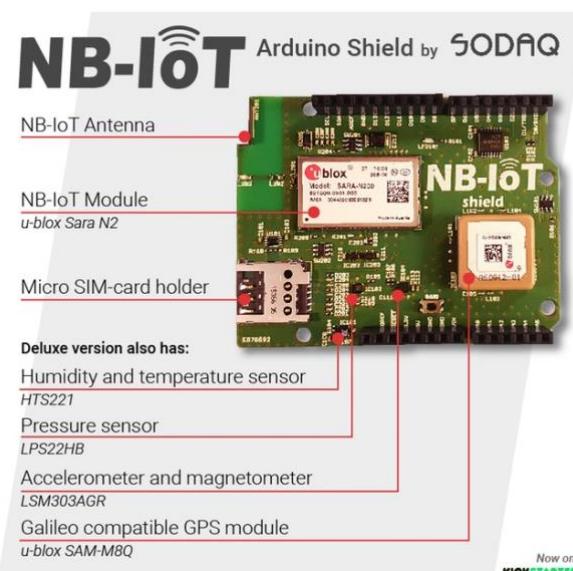


Fig. 3.3. Componentes placa de desarrollo SODAQ

Para los análisis de este TFM, finalmente se optó por la Pycom, principalmente porque esta nos permitiría avanzar conclusiones en un aspecto relevante, como es la complejidad en migrar un caso de uso LoRa a NB-IoT, utilizando la misma placa: GPY.

IDE y entorno de desarrollo

Para las tareas de programación de este proyecto se utilizó el IDE de ATOM, con su extensión de librerías para Pycom: pymakr.

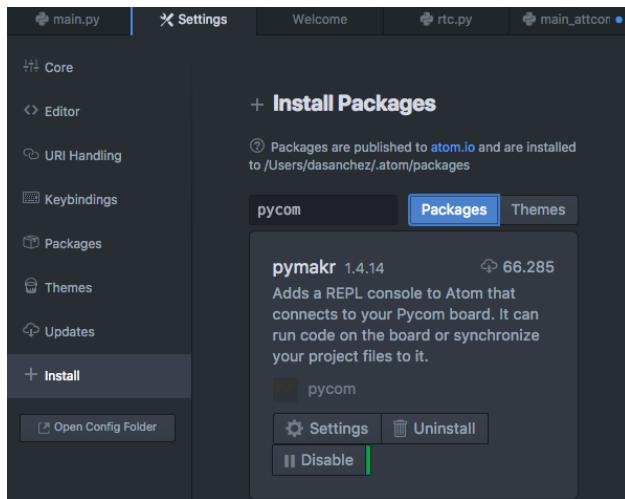


Fig. 3.4. Instalación pymakr en IDE Atom

3.1.2. Infraestructuras cloud: plataformas cliente/servidor

Analizado el hardware, y en base a la tipología de pruebas que se realizarían, era necesario seleccionar un entorno cliente/servidor al que enviar y del que recibir los paquetes de datos que se transmiten vía NB-IoT: un IaaS (*Infrastructure as a Service*) del que utilizaríamos sus servicios básicos de máquina virtual e IP fija.

Actualmente existe una amplia oferta de *clouds* públicos, de uso gratuito y con gran cantidad de funcionalidades que se adaptan a un proyecto de test para IoT.

Sin embargo, son precisamente muchas de esas funcionalidades “añadidas” las que han contado negativamente en su selección para la fase de laboratorio, donde no debe interponerse ninguna capa de tratamiento extra entre nuestro proceso de envío desde el cliente (nodo NB-IoT) y la recepción en el servidor (cloud).

Por este motivo, para el desarrollo del proyecto escogimos una máquina virtual de Azure, donde quedó alojado el programa servidor y el almacén de los logs de transmisión.

Opciones valoradas

AllThingsTalk (<http://maker.allthingstalk.com/>)

Microsoft Azure IoT Central

AWS IoT Core

Azure Máquina Virtual

3.1.3. Operadoras: servicio y redes disponibles

Seleccionamos dos de las operadoras con oferta NB-IoT en España:

Telefónica

Para los test de su tecnología NB-IoT, Telefónica nos proporcionó dos nano SIMs de su servicio “Movistar M2M”.

Hay que destacar una característica del servicio que Telefónica puso a nuestra disposición para las pruebas de evaluación, y que ha condicionado sus resultados en las pruebas: la celda de comunicación asignada a las SIMs NB-IoT es limitada y definida por una localización exacta en la que se realizará la conectividad a su red.

Por este motivo, Telefónica nos solicitó un máximo de dos ubicaciones geográficas fijas desde las que utilizar NB-IoT. En cada una de estas ubicaciones se nos asignó la celda más idónea, sobre la que se activaron los permisos de acceso de nuestras dos SIMs.

El grado en el que esta limitación afectó a las variables de evaluación de los test es diferente y, en cierto modo, desconocido, dado que la gestión de la transmisión realizada tras el enlace con la celda no es una información a la que hayamos podido acceder.

Los motivos expuestos por Telefónica para esta limitación en el uso de su red se centran en que el *pack* de evaluación queda restringido a pruebas muy acotadas que, una vez realizadas, deben dar paso a un contacto comercial para valorar un proyecto personalizado a cada empresa.

En cualquier caso, para los objetivos de este TFM, la desinteresada oferta de medios puestos a disposición por Telefónica ha sido más que suficiente para evaluar la situación actual de su servicio NB-IoT.

El servicio de Telefónica incluye acceso a una plataforma de gestión y control de las SIMs recibidas. Puede verse la pantalla principal de esta plataforma en la figura 3.5.

The screenshot shows a web-based application titled "Movistar Kite Platform". At the top, there's a header with the URL "https://kiteplatform-movistar-es.telefonica.com/#/sim/list", the date "Última visita: 05-06-2019 17:40:39", and user information "David Sánchez SOPRA_STERIA_ESPAÑA_KIT_NB". Below the header, the main content area has a title "TODAS" and a subtitle "2 SIMs". There are buttons for "Mostrar sección de filtros", "Búsqueda rápida", and "por fichero". A search bar is present with the placeholder "por ICC, IMSI, MSISDN...". The main table displays two rows of SIM card information:

Información de la SIM:	Parámetros de red	Información de dispositivos:	Consumo de tráfico n Grupos:	Presencia				
Número ICC	Número MSISDN	Estado	Número IMEI	Consumo Datos (*)	Suscripciones	País	Operador	Última tecnología acceso detectada
893407250003784091	34590100741461	Activada	354347092307690	1 kB	SOPRA_STERIA_ESP...	ESPAÑA	Telefónica Móviles E...	NB-IoT
893407250003784109	345901007385289	Listo para activ...		0 Bytes	SOPRA_STERIA_ESP...			

Fig. 3.5. Movistar Kite Platform. Plataforma de gestión de las SIMs enviadas en el Kit.

Del mismo modo, pudimos comprobar la calidad de su servicio de atención a cliente en temas técnicos muy específicos para la solución NB-IoT. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de incidencia real.

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone



Fig. 3.6. Movistar M2M soporte técnico

Vodafone

A principios de 2017, Vodafone España se convertía en la primera operadora en implementar NB-IoT, desplegando una red comercial NB-IoT en diferentes ciudades españolas.

Desde entonces, Vodafone ha lanzado su red NB-IoT en siete países más (Holanda, Irlanda, Turquía, República Checa, Sudáfrica, Italia, Australia y Alemania).

Vodafone puso a disposición de este proyecto un pack de pruebas consistente en veinte SIMs NB-IoT, con un servicio activo durante seis meses y con un coste para clientes de 100€, que no fueron facturados para este proyecto.

El servicio incluye acceso a una plataforma de gestión y control de las SIMs recibidas.

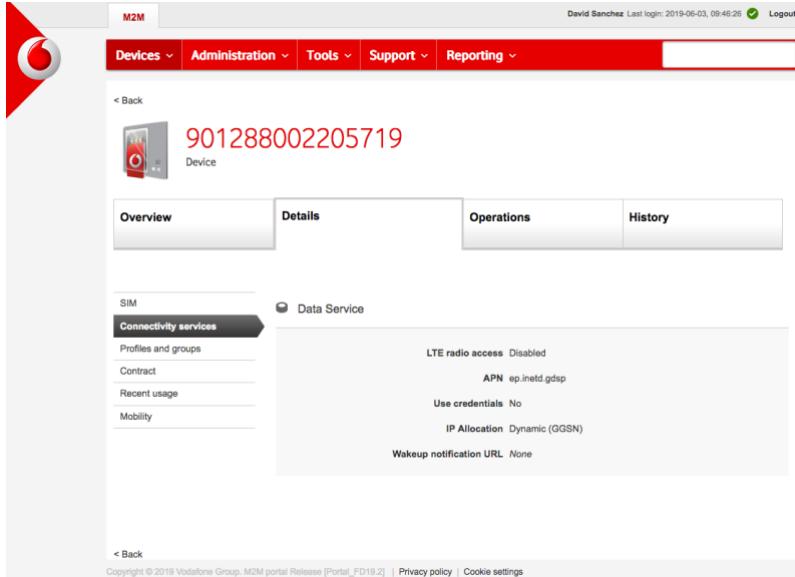


Fig. 3.7. Vodafone M2M. Plataforma administración SIMs

3.2. Tests

Las pruebas de laboratorio se han planteado con el objetivo principal de dotar a este TFM de una base científica que ponga en relación los aspectos teóricos de NB-IoT con la realidad tecnológica disponible en los servicios de Telefónica y Vodafone.

Todos los test se realizaron en las mismas condiciones para ambas compañías. La ubicación del dispositivo IoT, las características del entorno en el que se desarrollaron las pruebas, el horario en el que se realizaron, así como el hardware y software utilizados, debían ser los mismos para dotar de mayor valor a los resultados obtenidos.

Es necesario destacar que los resultados de las pruebas, así como las conclusiones a las que nos llevan, deben contemplarse desde el escenario temporal en el que se realiza este TFM. Tanto Vodafone como Telefónica evolucionan diariamente en su plan de desarrollo para NB-IoT y la situación actual de muchos de sus servicios sobre esta tecnología experimentará notables cambios a medida que pase el tiempo.

3.2.1. Definición y variables de evaluación

A continuación, se expone la relación de variables que se contemplaron a la hora de realizar las pruebas.

- Estado del servicio NB-IoT.

Conocíamos la oferta comercial que en sus canales digitales realizan tanto Vodafone como Telefónica, pero esa información tenía un enfoque generalista y siempre orientado a establecer un contacto con sus equipos comerciales para definir un proyecto IoT con ellos.

Por este motivo, la variable “Estado del servicio” nos dio acceso a la realidad de las soluciones tecnológicas de las dos compañías: disponibilidad de un servicio de comunicaciones sobre Narrow Band IoT y situación de éste para un enfoque de evaluación de sus características técnicas.

Fueron sus equipos comerciales quienes, en primer lugar, recibieron nuestra propuesta para compartir una experiencia de análisis como ésta. La aceptaron de forma muy positiva, entre otros motivos porque contar con un análisis realizado desde una empresa de consultoría y una universidad, aportaba una referencia importante en sus acciones comerciales.

Como veremos en el capítulo “4. Resultados”, NB-IoT es una tecnología disponible tanto en Telefónica como en Vodafone, pero con diferentes grados de evolución a día de hoy.

- Cobertura de la red.

Algunos factores externos al proyecto se convirtieron en variables de evaluación que han enriquecido el estudio. Tal es el caso del requerimiento, que hizo Telefónica, de contar con una ubicación geográfica predefinida desde

la que realizar las pruebas. Quizás motivada por la falta de un despliegue geográfico global para su servicio NB-IoT, lo cierto es que sólo pudimos transmitir desde dicha localización.

- Radio de conexión.

Como sucede en la variable “cobertura”, este es otro caso en el que la estrategia de la operadora condiciona la posibilidad de evaluar adecuadamente una característica de su servicio. Tanto Telefónica como Vodafone cuentan con estrictos planes de seguridad que nos han impedido conocer con exactitud la ubicación de las celdas que daban servicio a las tarjetas SIMs con las que realizamos nuestras pruebas.

En este caso, el valor de esta variable queda referenciado a los resultados extraídos de informes de otros estudios, detallados en la bibliografía.

- Latencia de subida

El tiempo que tarda en llegar al servidor una trama de datos enviada desde el cliente (Nodo IoT) mediante un socket UDP.

Su medida se realizó en milésimas de segundo, aunque para simplificar los gráficos se reformuló a una precisión de centésimas.

- Latencia de bajada

El tiempo que tarda en llegar al cliente una trama de datos enviada desde el servidor, como respuesta a la recepción del envío desde el mismo cliente.

Su medida se realizó en milésimas de segundo, aunque para simplificar los gráficos se reformuló a una precisión de centésimas.

- Pérdida de paquetes

Dado que el protocolo de transmisión sobre el que se apoya NB-IoT es UDP, desde los primeros planteamientos del trabajo se consideró importante conocer el número de paquetes que se extraviaban en las comunicaciones entre cliente/servidor y servidor/cliente.

Como se explicaba en secciones anteriores de este documento, UDP es un protocolo “ligero” en lo que se refiere a las comunicaciones de conexión y comprobación de los envíos. Este hecho lo hace idóneo para IoT al reducir ostensiblemente el tiempo de envío y, por ende, los consumos de energía de las placas que lo instalan.

Sin embargo, y a diferencia de TCP, UDP no dispone de un control de secuencias de paquetes enviados que permita solicitar el reenvío en tramas que se pierden en la transmisión. Por ello, es indicado para proyectos en los que la pérdida de un envío no sea crítica para la operativa global, principalmente porque con el siguiente envío los resultados calculados sigan siendo vigentes. Es el caso de un proyecto que realice medidas de radiación solar tomadas cada 10 segundos, donde la pérdida de una de ellas se compensa con la lectura correcta de la siguiente.

- Conectividad en zonas confinadas.

Las frecuencias de emisión y la modulación de señal aplicada por la tecnología NB-IoT la hacen muy idónea para casos de uso en los que el dispositivo emite desde estructuras con poca cobertura. Es el caso de la lectura de contadores de gas o agua, localizados en arquetas subterráneas a 1,5 o 2 metros de profundidad.

Recordemos que NB-IoT aprovecha las frecuencias e infraestructuras de LTE, de modo que con una cobertura insuficiente para una llamada de móvil, un dispositivo IoT sí puede realizar envíos de datos.

Para ambas operadoras se llevó a cabo un experimento de envío de información desde un parking subterráneo, probando en las plantas -1 (a tres metros de la superficie) y -2 (a seis metros, aproximadamente).

- Consumo de energía

Era necesario comprobar de primera mano la energía que consume un dispositivo que emite sobre NB-IoT.

Dado que la placa de desarrollo utilizada para todas las pruebas es la misma, la Pycom GPY, utilizamos la SIM de Vodafone para realizar unos test sobre conectividad equilibrada, que permitan obtener conclusiones sobre consumo sin el sesgo de la inestabilidad en los envíos.

Las pruebas de consumo de energía se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Físicas de la UCM, utilizando para ello un analizador de potencia Agilent Technologies N6705B, al que fue conectada la placa GPY (figura 3.8).

Este analizador tiene la funcionalidad de almacenar en ficheros CSVs los logs de medidas de intensidad, lo que resultó de gran ayuda a la hora de contrastar resultados y calcular Potencia y Energía para los ciclos programados en la placa como reposo, proceso y envío.



Fig. 3.8. Entorno de laboratorio en proceso de test, UCM Facultad de Físicas

3.2.2. Programación y ejecución

Condicionados por la utilización del protocolo de conexión UDP, así como por el requisito de contar con una capa de desarrollo ligera que no sesgara en exceso las mediciones de consumo de energía, se optó por utilizar conexiones sockets entre el cliente (nodo IoT, Pycom GPY) y el servidor (máquina virtual en la nube de Azure).

Los programas se desarrollaron sobre lenguaje MicroPython (cliente) y Python (servidor).

Fundamentalmente, son tres los programas que intervienen en las pruebas realizadas, si bien se desarrollaron algunos otros para dar contexto al entorno y completar comprobaciones de conectividad como tamaños de *payload*, formatos de tiempo, secuencia de comandos AT para evaluar conexión del módem, etc.

Los programas principales, disponibles en el repositorio GitHub del proyecto [25], apoyan la siguiente secuencia de ejecución:

- Tarea previa servidor: activación de una máquina virtual en Azure con IP fija
- Tarea previa cliente: actualización reloj del nodo IoT
Dado que este tipo de placas no cuentan con una batería permanente, su reloj de tiempo real está desactualizado (RTC). Para las pruebas, el cálculo de tiempo, tanto de subida como de bajada, exige que el reloj de la placa de desarrollo esté actualizado.

Para ello se ha realizado en Python el programa *rtc.py* que, ejecutado sobre la GPY mediante el IDE de Atom y aprovechando la conectividad WiFi de la placa, realiza una sincronización sobre protocolo NTP (*network time protocol*) del RTC de la placa. El recurso de red utilizado para obtener el valor del tiempo es “pool.ntp.org”.

```
rtc.ntp_sync("pool.ntp.org")
```

- Servidor. Máquina virtual de Azure.

En ella se localiza *udp_socket_receiver.py*, el programa Python que realiza la función de servidor UDP.

La ejecución de este programa deja al servidor a la escucha en el puerto 8080, pendiente de recibir la trama de datos desde el Nodo IoT (cliente).

Los datos sobre las tramas que recibe y reenvía en cada prueba son almacenados en un fichero de log en el directorio */TFM/logs*. Su descripción se detalla en el punto 3.5 de este capítulo.

- Cliente. Nodo IoT

Una vez que tenemos el RTC actualizado y el servidor UDP a la escucha en nuestra máquina virtual, el Nodo IoT debe iniciar el envío de las tramas de prueba.

Para ello, se ha desarrollado el programa *main.py*, alojado en la memoria de la Pycom GPY. Este programa realiza tres funciones:

- NB-IoT. Enlaza con el servicio de la operadora a través de su correspondiente APN () .
- UDP. Conecta con el socket.
- Realiza una prueba de 100 envíos/recepción para un paquete de tamaño prefijado para cada test (*payload*)

Debido a las características de los procesos de negociado y conexión con las celdas NB-IoT que ya hemos explicado, hay que prestar especial atención a los procesos de enlace (*attachment*) cuando intercambiamos las tarjetas SIM de diferentes operadoras en la secuencia de pruebas.

Al utilizar diferentes tarjetas en la misma placa, puede suceder que el módem quede configurado para los parámetros de conexión de la última operadora analizada, lo que requiere una actualización de sus valores de conexión mediante comandos AT. Los más relevantes, incluidos en el programa *main_attcommands.py*, gestionan los siguientes aspectos:

- Reinicio de la unidad
- Selección de banda
- Registro de red
- Asignación de IP
- Verificación de conexión
- Estado de la SIM
- Fuerza de la señal

3.3. Datos: almacén, post-procesado, paneles de resultados

Como entrada a los análisis, existen dos fuentes de datos generados en los procesos de cliente y servidor.

Tanto el proceso cliente (*main.py*) como el servidor (*udp_socket_receiver.py*), realizan un envío de tramas en dos direcciones, de modo que a la trama enviada por el proceso en cliente le sigue una respuesta del servidor con el mismo *payload*. En ambas tramas es el valor “tiempo de salida” el que nos permite calcular cuánto ha tardado una trama en viajar de un punto al otro.

Con cada operadora, se realizaron cinco bloques de transmisión de cien envíos cada uno. Cada bloque de transmisión se identifica con un peso en bytes aplicado a sus envíos, siguiendo esta distribución:

- Bloque 01. Cien envíos de 50 bytes cada uno.
- Bloque 02. Cien envíos de 100 bytes cada uno.
- Bloque 03. Cien envíos de 150 bytes cada uno.
- Bloque 04. Cien envíos de 512 bytes cada uno.
- Bloque 05. Cien envíos de 1024 bytes cada uno.

En la figura 3.9 se define el formato de la trama completa UDP enviada:

	A	B	C	D	E
1	2019-06-06 09:28:44 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 0 #1559813324.18948	50	
2	2019-06-06 09:28:45 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 1 #1559813325.505254	50	
3	2019-06-06 09:28:46 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 2 #1559813326.223256	50	
4	2019-06-06 09:28:46 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 3 #1559813326.851267	50	
5	2019-06-06 09:28:47 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 4 #1559813327.477276	50	
6	2019-06-06 09:28:47 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 5 #1559813327.883243	50	
7	2019-06-06 09:28:48 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 6 #1559813328.491269	50	
8	2019-06-06 09:28:49 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 7 #1559813329.355209	50	
9	2019-06-06 09:28:49 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 8 #1559813329.973303	50	
10	2019-06-06 09:28:50 UTC	('176.83.208.27' 11723)	0 9 #1559813330.333283	50	

Fig. 3.9. Detalle envío UDP paquete de 50 bytes

Columna “A”, se corresponde con el tiempo de salida (UTC). Para nuestros análisis no se utiliza ya que necesitamos mayor precisión (milisegundos)

- Columnas “B” y “C”, la cabecera UDP con los datos de conexión. En la “B” observamos la dirección IPV4 que la celda de la operadora ha proporcionado a nuestro Nodo NB-IoT. En “C” el puerto de comunicación establecido para el socket UDP.
- Columna “D”, la trama enviada. En la figura, se corresponden a un volumen de 50 bytes (“E”), en los que enviamos el cardinal del grupo de envío “0”, la secuencia de cada trama con la que evaluamos si se pierden paquetes (1, 2, 3, 10), un símbolo separador para facilitar la extracción del string correspondiente al valor “tiempo de salida”, este en microsegundos (RTC actualizado con NTP).

Contrastando el valor RTC del envío en su salida, con el propio aportado por el proceso que lo recibe, obtenemos la latencia de transferencia para los bytes enviados.

Este cálculo se realiza en las dos direcciones de envío: cliente/servidor, servidor/cliente, completando de esta forma la información del panel de datos tal y como se ve a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	TELEFÓNICA			Cliente --> Servidor			Servidor --> Cliente		
2	TimeStamp	Paquete	Bytes	Salida	Llegada	Tiempo Subida	Salida	Llegada	Latencia Bajada
3	2019-06-06 09:28:44 UTC	0 0 #1559813324.18948	50	1559813324,19	1559813325,34	1,15	1559813325,34	1559813325,50	0,16
4	2019-06-06 09:28:45 UTC	0 1 #1559813325.505254	50	1559813325,51	1559813325,91	0,40	1559813325,91	1559813326,22	0,31
5	2019-06-06 09:28:46 UTC	0 2 #1559813326.223256	50	1559813326,22	1559813326,50	0,28	1559813326,50	1559813326,84	0,34
6	2019-06-06 09:28:46 UTC	0 3 #1559813326.851267	50	1559813326,85	1559813327,25	0,40	1559813327,25	1559813327,47	0,22
7	2019-06-06 09:28:47 UTC	0 4 #1559813327.477276	50	1559813327,48	1559813327,63	0,15	1559813327,63	1559813327,88	0,25
8	2019-06-06 09:28:47 UTC	0 5 #1559813327.883243	50	1559813327,88	1559813328,26	0,38	1559813328,26	1559813328,48	0,22
9	2019-06-06 09:28:48 UTC	0 6 #1559813328.491269	50	1559813328,49	1559813329,10	0,61	1559813329,10	1559813329,35	0,25
10	2019-06-06 09:28:49 UTC	0 7 #1559813329.355209	50	1559813329,36	1559813329,75	0,39	1559813329,75	1559813329,97	0,22
11	2019-06-06 09:28:49 UTC	0 8 #1559813329.973303	50	1559813329,97	1559813330,22	0,25	1559813330,22	1559813330,33	0,11
12	2019-06-06 09:28:50 UTC	0 9 #1559813330.333283	50	1559813330,33	1559813330,68	0,35	1559813330,68	1559813331,37	0,69
13	2019-06-06 09:28:51 UTC	0 10 #1559813331.45316	50	1559813331,45	1559813331,47	0,02	1559813331,47	1559813331,69	0,22
...									
99	2019-06-06 09:29:35 UTC	0 96 #1559813375.855207	50	1559813375,86	1559813376,14	0,28	1559813376,14	1559813376,28	0,14
100	2019-06-06 09:29:36 UTC	0 97 #1559813376.287234	50	1559813376,29	1559813376,78	0,29	1559813376,78	1559813376,94	0,16
101	2019-06-06 09:29:36 UTC	0 98 #1559813376.945335	50	1559813376,95	1559813377,33	0,38	1559813377,33	1559813377,49	0,16
102	2019-06-06 09:29:37 UTC	0 99 #1559813377.495266	50	1559813377,50	1559813377,77	0,27	1559813377,77	1559813378,13	0,36

Este panel de datos se complementa con los cálculos propios de cada análisis, ya sean de latencia o de consumo de energía, y con una serie de gráficos que analizaremos en detalle en el capítulo “4. Resultados”.

4. Resultados

En este capítulo se analizan los datos que han resultado de la realización de los test de transmisión de datos.

Primeramente, se ponen en común los resultados obtenidos para cada operadora, creando la comparativa de resultados para sus servicios NB-IoT.

A continuación, se expondrán los datos independientes de cada una de las operadoras, explicando los aspectos más interesantes descubiertos en fase de pruebas, y completando con ellos una matriz en la que se asignan los valores a las variables de evaluación.

Se cierra el capítulo con los test de energía para la placa con la que se han realizado las pruebas.

Anomalías en común.

Un comportamiento constante en todas las pruebas, y común en ambas operadoras, ha sido la aparición aleatoria de valores extremos a lo largo del ciclo de envíos.

Estos “*outliers*” o “picos” de latencias elevadas fueron puestos en común con los equipos técnicos de Telefónica y Vodafone, siendo muy similar la explicación que ambos daban a este comportamiento.

En su opinión, la gestión de los envíos en sus redes NB-IoT se comporta de forma diferente según se trate de conexiones en pruebas, como es nuestro caso, o conexiones de clientes. Para estas últimas indican que prácticamente no existen dichos picos temporales.

También coinciden en señalar que esta anomalía no es crítica en los proyectos NB-IoT, donde se ha optado por un diseño de hardware y software más ligero, para casos de uso en los que prevalece eficiencia de costes sobre seguridad en los envíos.

4.1. Conectividad

4.1.1. Vodafone. Fortalezas y debilidades

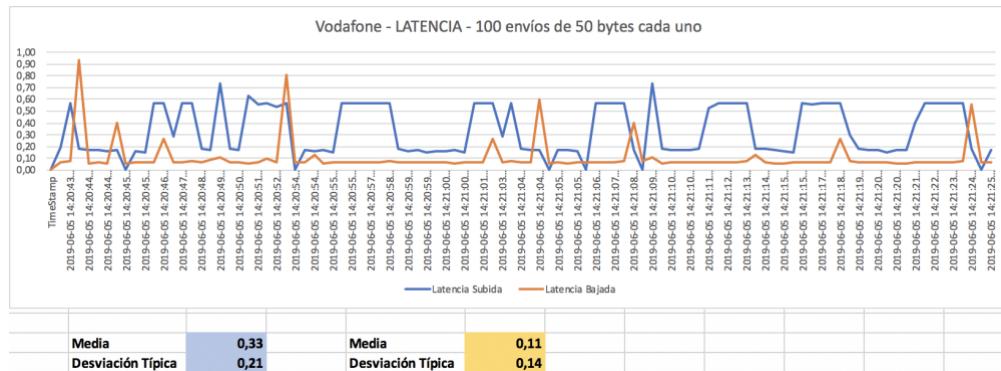
La tecnología de Vodafone fue la que experimentó un comportamiento más estable en los test de servicio realizados.

Por este motivo, se ha considerado exponer sus resultados antes que los obtenidos con Telefónica, cuyas pautas fueron más erráticas.

Latencia

Los resultados de los test de **latencia** realizados sobre el servicio NB-IoT de Vodafone fueron los siguientes.

- Test de envío de 100 mensajes de **50 bytes** cada uno
Se trata del envío de 100 mensajes, con un decalaje de un segundo entre cada envío, y un tamaño de paquete de información de 50 bytes.



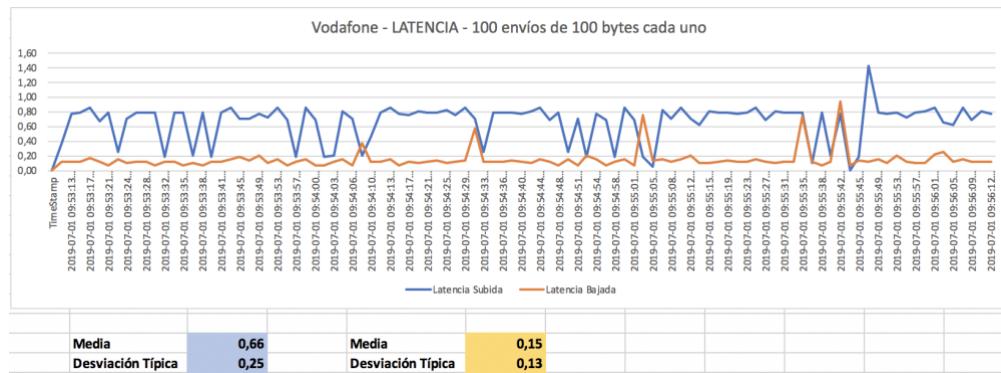
Latencia de subida (del Nodo al cloud)

- Media: 0,33 s
- Desviación típica: 0,21
- 150 bytes/s

Latencia de bajada (del cloud al Nodo)

- Media: 0,11 s
- Desviación típica: 0,14
- 467 bytes/s

- Test de envío 100 mensajes x **100 bytes**



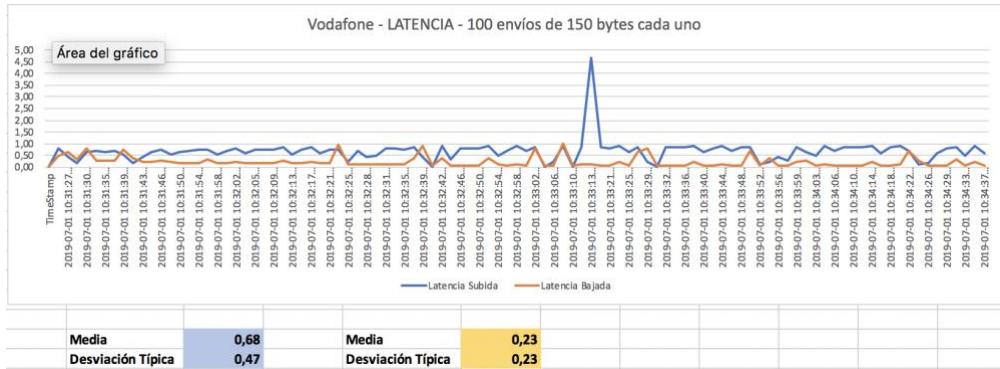
Subida: 150 bytes/s

Bajada: 646 bytes/s

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

- Test de envío 100 mensajes x **150 bytes**

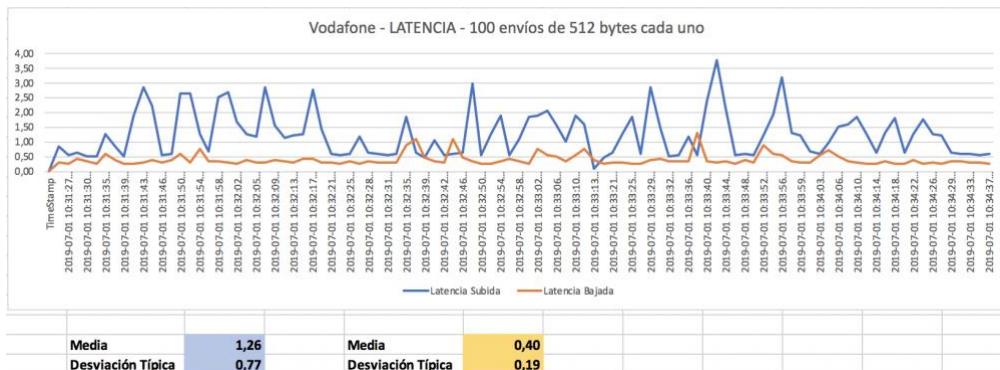


Subida: 219 bytes/s

Bajada: 643 bytes/s

- Test de envío 100 mensajes x **512 bytes**

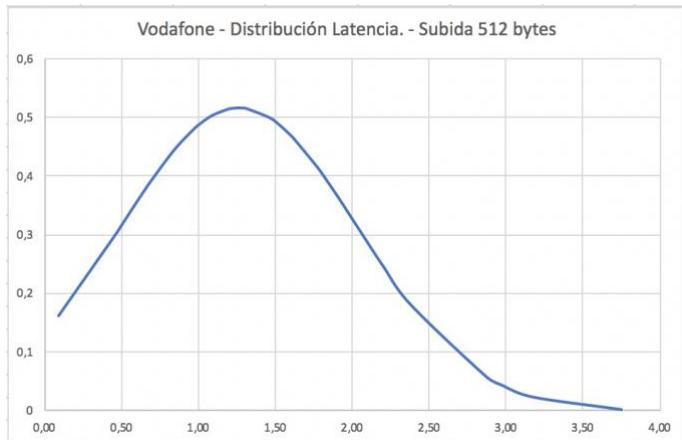
En este caso, el valor de la desviación típica en los resultados de subida nos habla de una tendencia más acusada en la aparición aleatoria de los “picos de tiempo”. Esto demuestra que, en subida, el comportamiento de la latencia es menos estable que en el test de 150 bytes. Por el contrario, los tiempos de descarga se mantienen más equilibrados.



Subida: 405 bytes/s

Bajada: 1265 bytes/s

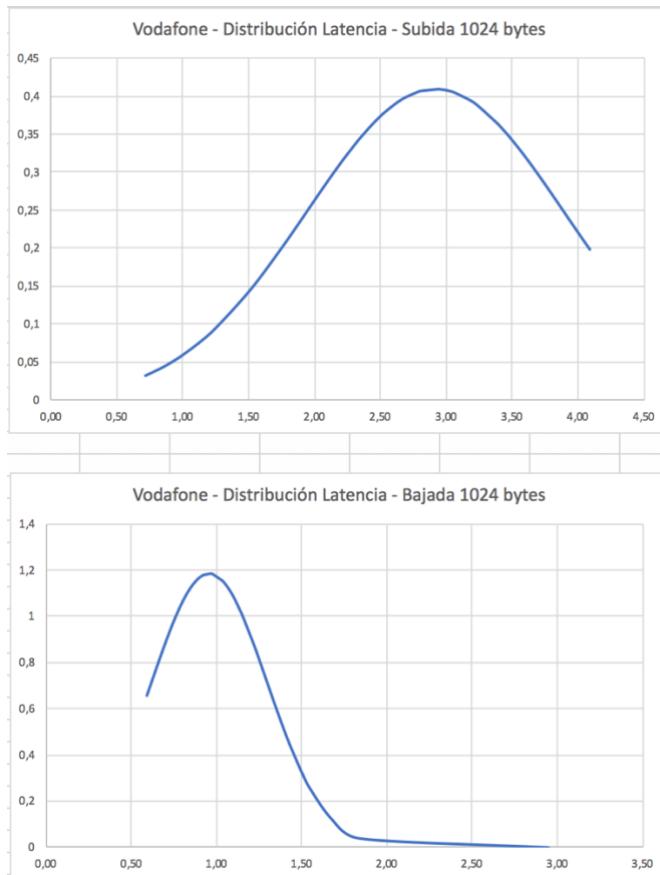
Podemos observar la distribución de los valores de subida para paquetes de 512 bytes, donde la forma obtenida nos habla de una “inestabilidad” en los valores de las latencias (distribución asimétrica sesgada a la derecha).



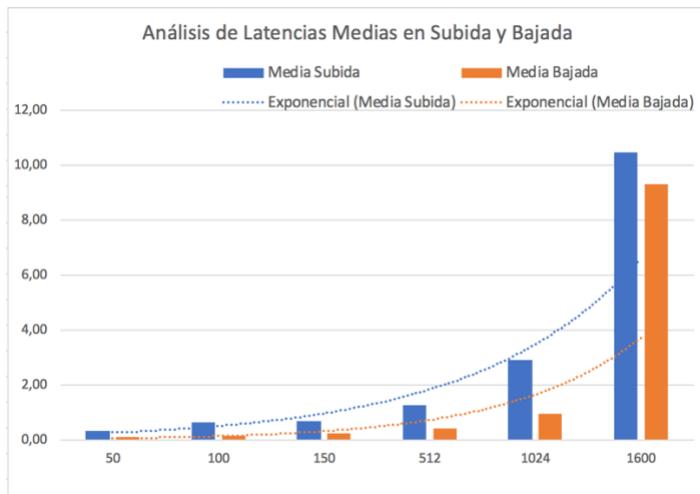
- Test de envío 100 mensajes x **1024 bytes**

De nuevo, nos encontramos con un comportamiento irregular provocado por los “picos de tiempo” (*outliers*) en las latencias de subida, en contraste con una gráfica más estable en las de bajada.

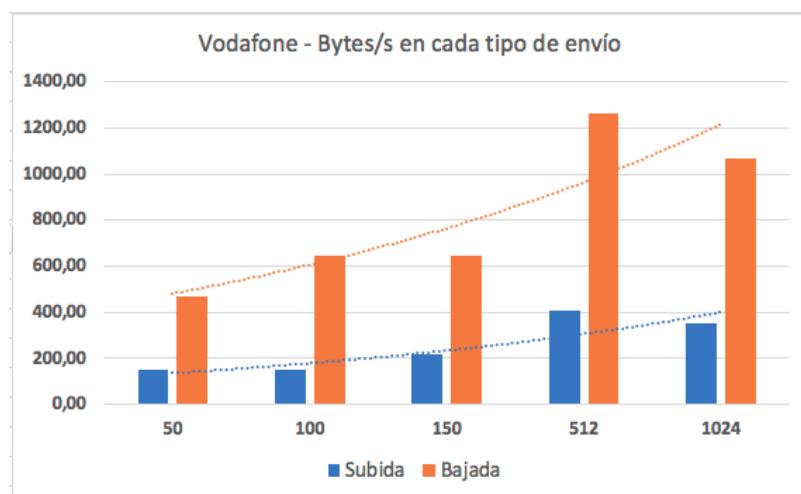
La gráfica para los datos de subida nos indica dos cosas: que los “picos de tiempo” (*outliers*) excepcionales corresponden a latencias bajas y que la diversidad de valores es amplia. Por el contrario, la campana correspondiente a las latencias de bajada, indica una concentración mayor de valores próximos y, por tanto, mayor estabilidad, que ha sido común en todos los test de envío desde el servidor al cliente.



- Comparativa en resultados medios de **latencia**, por bloques de envíos



- Las latencias de subida son una media del 30% superiores a las de bajada.
 - A partir de 150 bytes, existe una relación proporcional entre la longitud del payload y el tiempo de envío.
 - Los datos obtenidos para el envío de longitud máxima indican que el payload óptimo se encuentra en el intervalo de valores que mantienen estable la relación bytes/latencia.
 - En cuanto al análisis de Desviaciones Típicas, podemos deducir que los comportamientos de latencias de envío son más estables en un rango bajo de tamaño de bytes (entre 100 y 512 bytes). A partir de ese volumen, comenzamos a apreciar un incremento importante en los “picos de tiempo” así como en ratio de bytes enviados o recibidos por segundo.
- Comparativa en resultados de **data rate**, por bloques de envíos



- La figura anterior representa la evolución del *data rate* (velocidad en la que un mensaje es transmitido), medido en bytes/s, para envíos de 50, 100, 150, 512 y 1024 bytes.
- Apoyando el análisis de latencias, la gráfica confirma una situación de uso óptima para envíos entre 150 y 512 bytes, degradándose el ratio a partir de 1024 bytes.

Pérdida de paquetes

No se observaron pérdidas de ningún paquete durante la realización de las pruebas. Tampoco se produjeron incidencias o paradas de los envíos en ningún momento.

Conectividad en zonas confinadas

Se consiguieron envíos completos, similares en latencia a los otros experimentos y sin pérdidas de paquetes, desde un sótano -1 (3 metros bajo tierra, aprox.). En un sótano -2 la conectividad NB-IoT no fue posible.

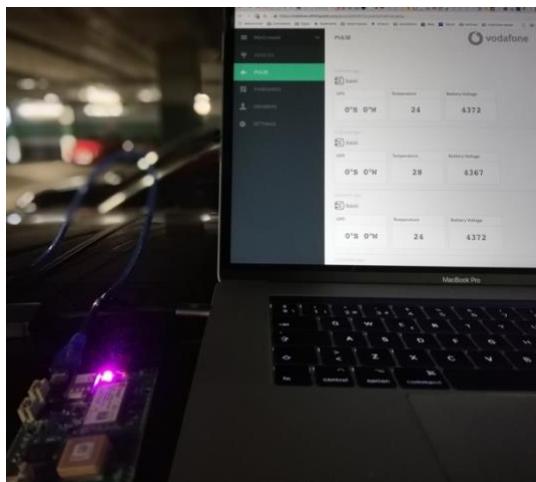


Fig. 4.1. Enlace a red Vodafone en sótano -1 (avda. Manoteras, 48)

Conclusión

El comportamiento de la latencia observado en los test sobre la tecnología NB-IoT de Vodafone fue muy equilibrado.

El enlace y conexión con la celda asignada, realizados siempre al inicio de cada grupo de envíos, se obtuvo en menos de 10 segundos en todas las ocasiones, un valor menor al obtenido con la red de Telefónica.

En ningún momento se perdió la comunicación con la celda, finalizando todos los procesos en la forma en que estaban programados los desarrollos cliente y servidor.

4.1.2. Telefónica. Fortalezas y debilidades

Sobre Telefónica no se consiguieron resultados completos sobre envíos de 512 y 1024 bytes. A pesar de repetir los intentos, para el primer caso se consiguieron realizar cuarenta y cinco envíos, y en el segundo sólo treinta y cuatro.

El motivo, sin estar esclarecido pese a ser expuesto a sus equipos técnicos, está relacionado con el estado técnico de la solución que proporcionan en la modalidad de “pruebas de cliente”, ya detallado en el capítulo anterior.

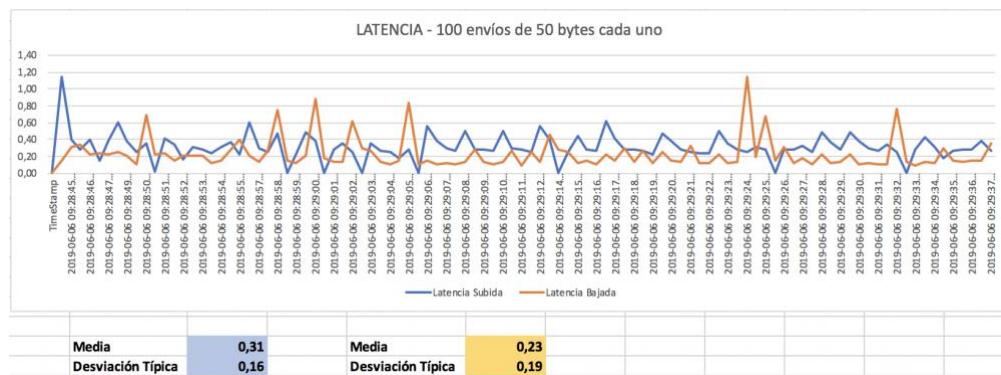
Para mejorar en el procesamiento de envío masivos, ambas operadoras recomiendan una solución NB-IoT basada en una Red Privada Virtual (VPN) exclusiva para cada cliente, con un coste de servicio, en vez de una conexión mediante sockets a una IP fija como la ofrecida para procesos de evaluación.

Latencia

Los resultados de los test de **latencia** realizados sobre el servicio NB-IoT de Telefónica fueron los siguientes.

- Test de envío de 100 mensajes de 50 bytes cada uno
Se trata del envío de 100 mensajes, con un decalaje de un segundo entre cada envío, y un tamaño de paquete de información de 50 bytes.

En el gráfico, la latencia queda expresada en centésimas de segundo.



Latencia de subida

- Media: 0,31 s
- Desviación típica: 0,16

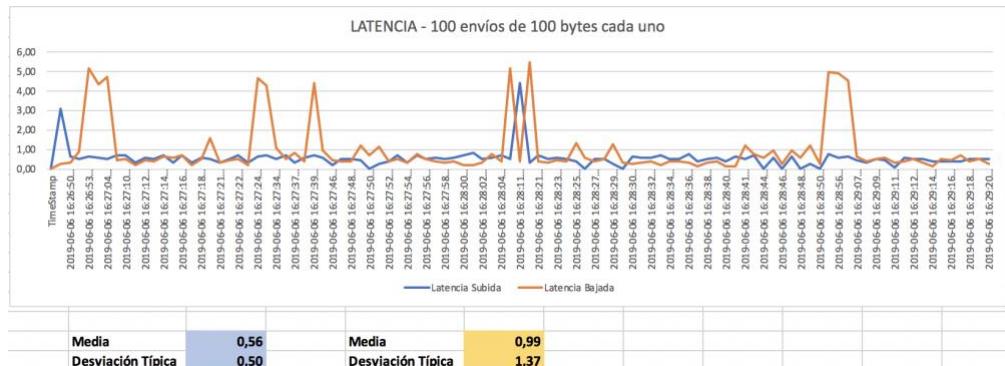
Latencia de bajada (del cloud al Nodo)

- Media: 0,23 s
- Desviación típica: 0,19

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

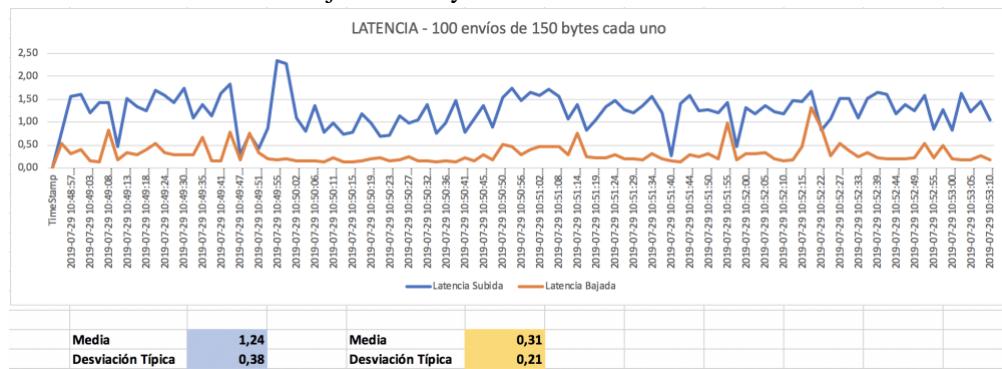
- Test de envío 100 mensajes x 100 bytes



En la gráfica observamos como los “*outliers*” excesivamente elevados han retocado al alza la media de tiempo de todo el envío.

Este suceso ha sido frecuente en las pruebas de Telefónica y hay que tenerlo en cuenta a la hora de comentar la comparativa de latencias con Vodafone.

- Test de envío 100 mensajes x 150 bytes



- Test de envío 100 mensajes x 512 bytes



NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

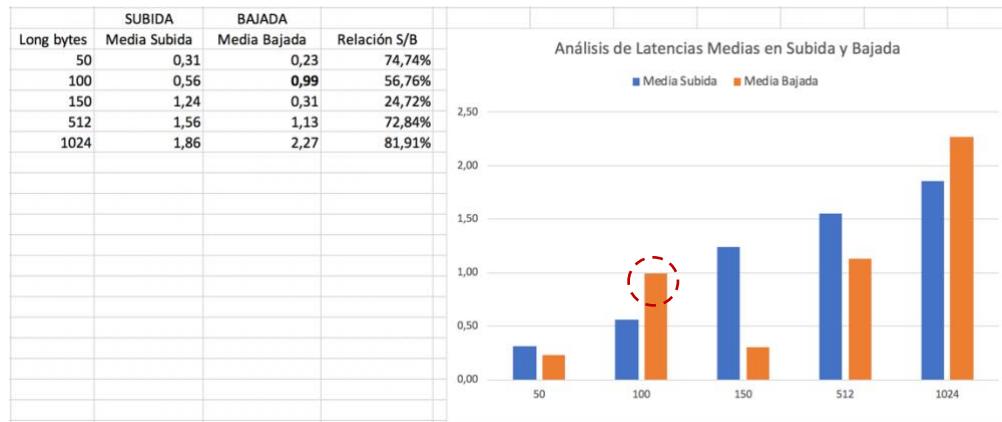
Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

- Test de envío 100 mensajes x 1024 bytes

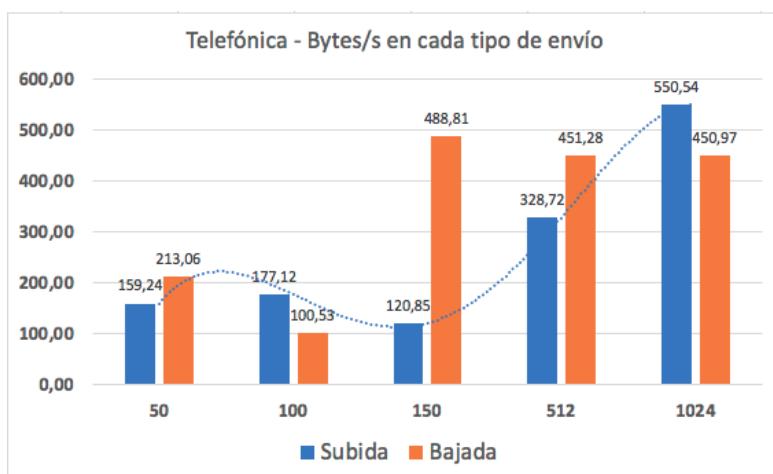


Aunque la prueba estaba programada para cien envíos, la comunicación quedó interrumpida tras enviar el número 34. La conexión con la celda se mantuvo activa y el socket permaneció abierto; fue la gestión del envío la que se perdió en algún punto de la red de Telefónica.

- Comparativa agrupada en resultados medios de **latencia** por bloques de envíos



- Comparativa en resultados de **data rate** (velocidad en la que un mensaje es transmitido), por bloques de envíos



- La figura anterior representa la evolución del *data rate*, medido en bytes/s, para envíos de 50, 100, 150, 512 y 1024 bytes.
- Los valores experimentan un comportamiento errático que impide sacar conclusiones claras, como pudimos hacer en el caso de Vodafone.

Pérdida de paquetes

Aunque no se observaron pérdidas de paquetes en las secuencias enviadas, sí se produjo la interrupción del envío para los grupos de 512 y 1024 bytes.

Conectividad en zonas confinadas

Prueba fallida: en una planta sótano -1, no se consiguió conectividad NB-IoT para realizar en enlace con la celda de comunicación (figura 4.2).

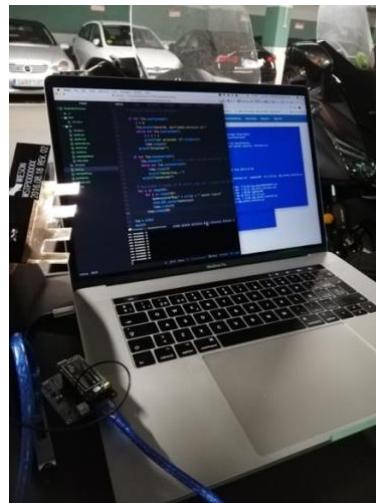


Fig. 4.2. Secuencia de “Not attachment” a la red de Telefónica desde sótano -1

Conclusión.

Al evaluar los resultados de Telefónica, debemos tener en cuenta que la disponibilidad de su red de comunicación está limitada en tiempo de pruebas.

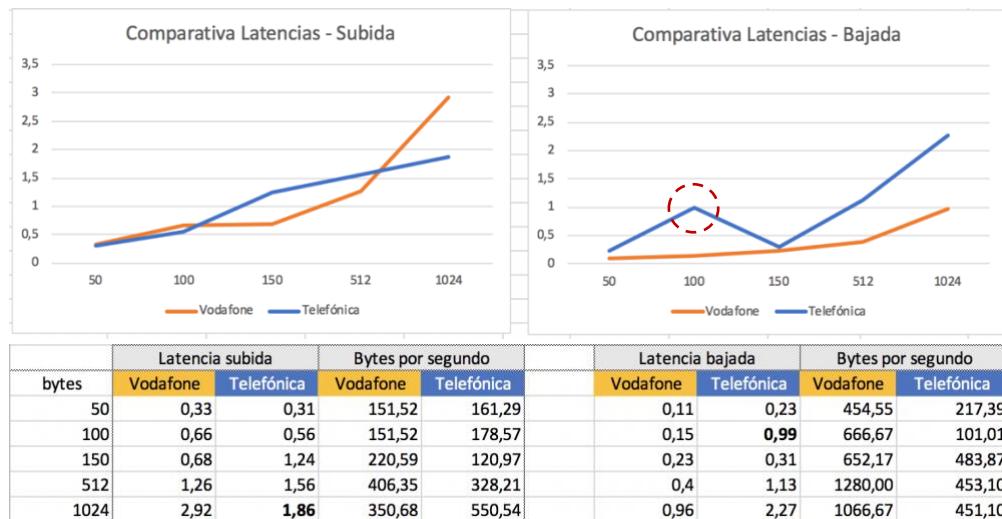
Ya se ha comentado que uno de los requisitos de la operadora para solicitar sus SIMs de NB IoT fue indicar la ubicación desde la que iban a realizarse las comunicaciones. Esto indica que sólo activan la celda cercana a la dirección postal informada en el alta del servicio.

Esta particularidad bien puede afectar a la capacidad total de gestionar cien envíos, provocando, como hemos visto, la interrupción total llegado a cierto número de paquetes (caso de los correspondientes a 512 y 1024 bytes).

A pesar de ello, las lecturas de latencia para los envíos realizados se han visto menos afectadas, pudiendo considerarlas como válidas para las comparativas de este estudio.

El enlace con la celda asignada para nuestra SIM requirió tiempos de espera mayores a los de Vodafone, del orden del 70% más altos. Así, la tarea de conexión siempre estuvo por encima de los 16 segundos, cuando en Vodafone no superó los 10 segundos.

4.1.3. Comparativas



(Fig. 4.3 Comparativa latencias Vodafone vs Telefónica fte.: [25] NB IoT_latencias_comparativa.xls)

Algunas reflexiones a raíz de estos datos:

- En Vodafone, los tiempos de bajada son siempre inferiores a los de subida. Del mismo modo, Telefónica presenta también anomalías en esta variable.
- En subida, el comportamiento de ambas operadoras es muy similar entre los 50 y los 100 bytes de *payload*.
- En datos de bajada, las curvas de crecimiento de latencia son paralelas para ambos operadores, siendo, en todas las medidas, la latencia de Telefónica superior a la de Vodafone.
- Hasta volúmenes de 512 bytes, cifras elevadas para los casos de uso de NB-IoT, los tiempos de subida crecen en relación con el tamaño del *payload*, algo más elevados para Telefónica, pero siempre por debajo de los 1,5 segundos.
- Se hace evidente que el intervalo entre 50 y 150 bytes es el más estable y de crecimiento más progresivo. A partir de los 512 bytes, los tiempos de envío se incrementan, perdiendo la progresión aritmética respecto a la longitud del envío. Este comportamiento es especialmente visible en la subida.
- En general, unos valores de entre 120 y 220 bytes por segundo, obtenidos en longitudes de 50 a 150 bytes, son valores muy interesantes para cualquier caso de uso en el que se necesite realizar envíos cada segundo desde el nodo IoT.

4.1.4. Breve comparativa de latencia: NB-IoT vs LoRaWAN

Aunque este estudio se enfoca a NB-IoT, es necesario completar la visión de esta tecnología mostrando cómo se comporta respecto a otras soluciones LPWAN, especialmente con LoRaWAN, que es la utilizada más extensamente como alternativa sin costes ni intermediarios de red en el espectro no licenciado.

Utilizando para LoRaWAN los análisis de fuentes externas [43], y para NB-IoT los obtenidos en nuestros test con Vodafone (fig.), obtenemos la tabla comparativa del data rate para cada una de estas tecnologías.

Al hacerlo, obtenemos la siguiente tabla para un envío de 50 bytes:

Payload	NB-IoT (data-rate bytes/s)	LoRaWAN (data-rate bytes/s)	LoRa WAN Duty cycle 1%
50 bytes	151,52	2,18	0,021

- Aún sin considerar el efecto “duty cycle 1%” que afecta a LoRaWAN por desarrollarse en el espectro no licenciado, NB-IoT tiene un data-rate setenta y cinco veces superior al de LoRaWAN.
- Si aplicamos el “duty cicle del 1%”, el ratio de envío en LoRaWAN es aún menos competitivo respecto a NB-IoT: 0,021 bytes/s

Con estos resultados, se evidencia la ventaja que supone utilizar NB-IoT para proyectos que requieran mayor velocidad de transmisión.

4.2. Consumo de energía

En esta prueba se realizó la medida de intensidad para la ejecución del proceso *main.py* con un **bloque de diez envíos**. Dado que era necesario contar con una medida de tiempo elevada, que permitiera diferenciar y seleccionar los diferentes intervalos del proceso (reposo, pre-proceso y envío), se optó por una longitud de **1024 bytes cada uno**.

Para la realización de los test de consumo se utilizó un equipo N6705B Power Analyzer, que podemos ver en ejecución en la figura 4.4.

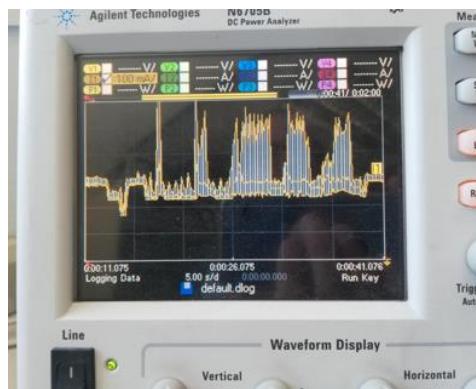


Fig. 4.4. DC Power Analyzer utilizado en los test

Los datos de él obtenidos, así como las fórmulas y gráficos desarrollados para su análisis, están incluidos en el archivo *NBIoT_test_consumo_UCM.xls* ubicado en el repositorio Github del proyecto [25].

Este fichero tiene el siguiente formato:

Configuración

Voltaje: 3.3 V

Intervalo de lectura: 0,009994 s

Fichero log:

Formato CSV

Cien filas por segundo

Datos:

Número de lectura (Sample)

Intensidad amperios (Curr avg)

N6705B exported datalog	
Sample interval: 0.00999424	
Trigger sample: 0	
Date: Thu Jul 11 12:42:23 2019	
Sample	Curr avg 1
0	0,0844607
1	0,0844674
2	0,084806
3	0,0841708
4	0,0844293
5	0,0838432
6	0,0828452
7	0,086484
8	0,0918841
9	0,0960627
10	0,0998182
11	0,0994511
12	0,0914488
13	0,0931783
14	0,0956182
15	0,0890212
16	0,0880308
17	0,085906

En los test de consumo se obtuvieron los siguientes resultados:

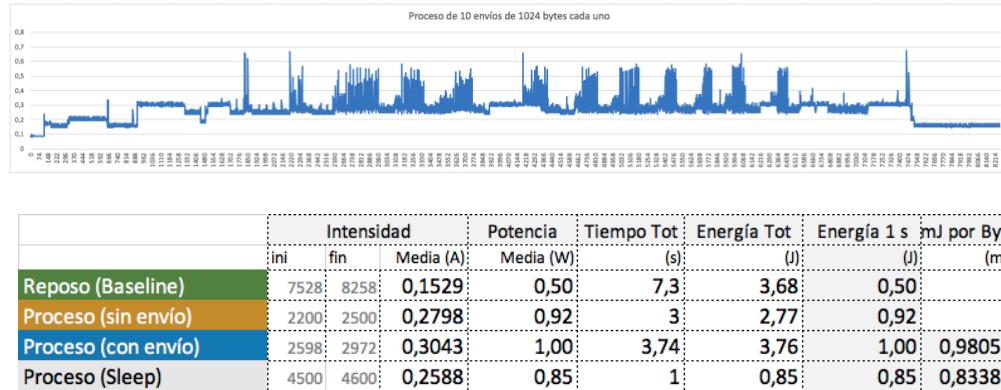


Fig. 4.5. Consumo de energía. Resultados sobre una GPY con tecnología NB-IoT de Vodafone

Antes de comentar los resultados expuestos en la figura 4.5, es conveniente detallar el significado de la información que representa:

- En la gráfica se representan los valores de intensidad en Amperios (eje vertical) y momento temporal del proceso, en milisegundos (eje horizontal).
- Se observa el ciclo completo del experimento, con los siguientes intervalos de tiempo:
 - o [0, 900], la conexión de la placa a la fuente de alimentación

- [900, 1460], inicialización sistema operativo
 - [1800, 2597], inicio de programa, apertura sockets (primer “pico” de consumo), definición y carga de variables, conexión y enlace a la red de Vodafone, etc.
 - [2598, 6550], los diez procesos de envío, con decalaje de un segundo entre cada uno
 - [6551, 7498], cierre de socket, desconexión de la red, fin de programa
- Las fórmulas y constantes empleadas para obtener los resultados son las siguientes:
- Voltaje de la placa = 3.3V
 - Potencia (W) = Intensidad (A) * Voltaje (3.3 V)
 - Energía (J) = Potencia (W) * Tiempo (s)
 - Energía por byte. J / 1024

4.2.1. Resultados obtenidos

Como variables de evaluación, se han seleccionado los datos pertenecientes a diferentes estados de la placa en el ciclo analizado.

Este es el panel de resultados que vamos a detallar en las líneas siguientes:

- Baseline.

Rango de valores en los que la placa ha finalizado el proceso main.py, pero se mantiene encendida y con la ejecución del firmware.

Para este cálculo, se han seleccionado los datos proporcionados por el log del analizador, comprendidos entre los segundos 75,28 y 82,58.

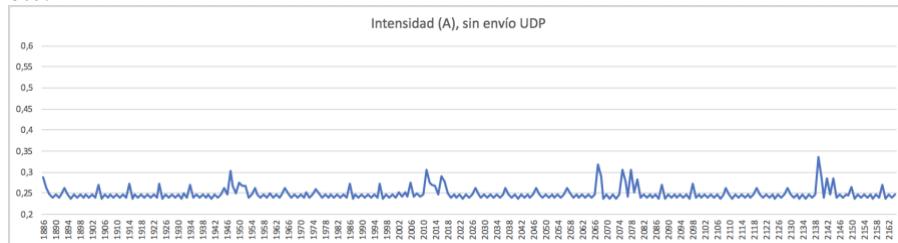
La **energía consumida** por la placa en un estado de inactividad, donde no se está ejecutando el proceso main.py, es de **0,50 J**.

- Proceso sin envío.

Correspondiente a los intervalos en los que la placa está ejecutando los procesos de main.py previos al envío (creación del socket, negociación celda, carga de variables de envío).

En su cálculo intervienen las lecturas realizadas entre el segundo 22 y el 25.

En este caso, se consumen **0,92 J** en procesos como inicializaciones de variables, bucles sencillos de asignación de datos, definición de funciones, etc.

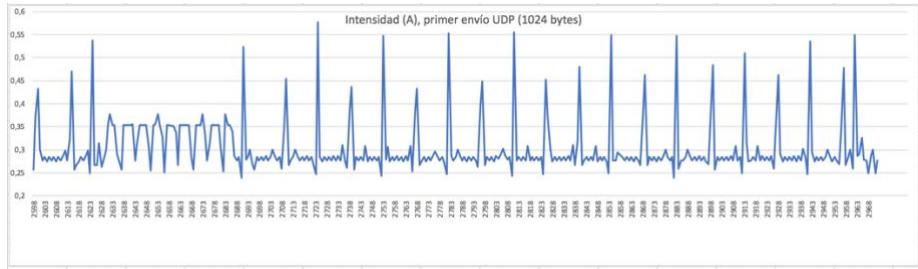


- Proceso de envío.

En la figura 4.4 se observan fácilmente las diez secciones correspondientes a los diez envíos. Cada una se ha señalado con una flecha horizontal.

Para este cálculo se ha utilizado el intervalo correspondiente al primer envío.

El consumo de energía total, para los 3,74 s de duración del primer envío, arroja un resultado de **3,76 J**.



- Proceso durmiente (Sleep)

Correspondiente a los intervalos del proceso en los que la ejecución entra en fase de espera, definida en segundos.

En la codificación de main.py se ha utilizado un time.sleep() de un segundo entre cada envío.

En este estado, los consumos de placa son de **0,85 J** por segundo.

- Consumo medio por byte transmitido.

La mayoría de comparativas de consumo de energía para tecnologías LPWAN adoptan el formato “mJ/byte”. En base a ello, y teniendo en cuenta que el envío analizado fue de 1024 bytes y tuvo una duración de 3,75 s., obtenemos un **consumo de energía por byte de 0,98 mJ**.

4.2.2. Escenarios de dispositivo con batería.

Considerando que la alimentación del dispositivo IoT debe provenir, en muchos casos de uso, de fuentes independientes a la red eléctrica, a continuación, se exponen los cálculos de duración de batería para configuraciones de nodo como la utilizada en nuestras pruebas.

Se propone un caso de uso en el que un nodo IoT construido sobre una Pycom GPY+Pysense, realiza envío de 50 bytes alternos con intervalos de inactividad (“sleep”).

Los datos utilizados para estos cálculos son los obtenidos en las lecturas reales de los experimentos y en las especificaciones de las baterías analizadas. Estos son:

- Tipo de proceso.

En los test de consumo hemos constatado que los valores de intensidad (A) varían de un proceso a otro [fig. 4.5].

En nuestro escenario consideraremos los dos procesos que se alternan cíclicamente en el caso de uso: Envío y Sleep.

- Capacidad de la batería.

Suele informarse en el producto como Amperios/hora (Ah) o miliamperios/hora (mAh), aunque para nuestros cálculos la expresaremos en Amperios/segundo (As).

- Tipo de batería.

Para nuestra placa de 3.3V, contemplaremos la utilización de baterías AA de 2.5 A y un voltaje de 1.2v, por lo que necesitaremos tres unidades, cuyo coste total asciende a 12€, en formato recargable [46].

- Intensidad media.

Medida en Amperios por segundo, es la obtenida en nuestros test para los envíos de 1024 bytes.

- Usos de la pila (s).

Indica cuántos consumos de un segundo, y de intensidad media devuelta por nuestros tests [fig. 4.5], admite la batería en base a su amperaje.

- Sleep (s).

Tiempo de la fase de espera entre envío y envío, medido en segundos.

Es una variable muy importante a la hora de optimizar la vida útil de la batería de nuestro dispositivo IoT. Por ello, al abordar un nuevo proyecto, siempre es necesario preguntarse con qué frecuencia debemos realizar nuestras transmisiones.

- Mensajes.

Número de mensajes que puedo realizar en base a los usos de pila y el tiempo de transmisión.

En base a estas variables, y como herramienta que ayude a diseñar diferentes configuraciones, se ha desarrollado una hoja Excel disponible en el repositorio de aplicaciones del TFM (NB IoT_calculos_bateria_v02.xlsx) [25].

Batería. Calculo de vida útil en base a test Pycom GPY / NB-IoT				
sept-19				
	Cantidad	Ah	mAh	As
Pila AA	3	2,5	2500	27000
	bytes	Tiempo (s)	Intensidad Media (As)	bytes*s
Con Envío	50	0,33	0,3043	151,5151515
Sleep	0	1,00	0,2588	
	bytes	Usos de pila (s)	Sleep (s)	Mensajes Duración batería (h)
Envío	50	88.728,23	0	268.873,42 24,65
Envío + Sleep	50	47.948,85	10,00	145.299,56 416,93
Envío + Sleep	50	47.948,85	600,00	145.299,56 24.229,91
				Años... 2,77

Fig. 4.6. Escenarios de baterías. Resultados sobre una GPY con tecnología NB-IoT de Vodafone

En la figura 4.6 se muestra la hoja de calculo desarrollada, en la que se han parametrizado valores para dos escenarios:

Escenario 01

Tres pilas de 2,7 Ah. Con envíos de 50 bytes cada 10 segundos → 416 horas

Escenario 02

Tres pilas de 2,7 Ah. Con envíos de 50 bytes cada 10 minutos → 2,77 años

A partir de esta hoja, crear nuevos análisis es una tarea sencilla.

5. Aplicación

Como hemos explicado en este estudio, NB-IoT proporciona una conectividad de radio dentro del espectro licenciado que permite a los dispositivos conectarse a internet sin necesidad de mediar un Gateway que concentre y distribuya la información recibida.

Así mismo, sus características de diseño redundan en un bajo consumo, una frecuencia de envíos y tamaño de *payload* mayor que la de sus competidores en el espectro no licenciado y una mejor cobertura en espacios confinados.

Con estas variables, los proyectos en los que resulta más interesante aplicar esta tecnología, frente a otras alternativas celulares o LPWAN, son aquellos en los que:

- la lectura/emisión del dato a internet deba ser muy frecuente y con tasas de muestreo cercanas al segundo, pero donde la pérdida de alguna lectura de la secuencia temporal no sea crítica;
- en casos de seguimiento de objetos con movilidad geográfica, donde los tiempos de reconexión entre celda y celda de la operadora (siempre inferiores a 10 segundos) no son significativos para el nivel de latencia exigido en el caso de uso;
- el espacio en el que ubica el dispositivo tiene poca cobertura o experimenta interferencias en el espectro radio eléctrico, por tratarse de una zona subterránea, con elementos arquitectónicos densos, estructuras metálicas, etc.

De la misma forma, podemos destacar en qué situaciones es menos adecuado plantear un proyecto IoT basado en la tecnología NB-IoT:

- Cuando queremos realizar un seguimiento exhaustivo de un bien en movimiento con desplazamientos geográficos en grandes distancias.

Las características técnicas de NB-IoT, explicadas en el capítulo 2.4, su convivencia con las comunicaciones en bandas de frecuencia de LTE, así como el tipo de operación que realiza para gestionar los envíos en el mismo “Carrier”, provocan que el enlace a cada nueva celda requiera más tiempo que el de una comunicación LTE estándar.

En estos casos, en función de los costes y del modelo económico, quizás sea más conveniente una solución celular 4G (o futura 5G) o LPWAN propietaria (Sigfox). Ejemplo: control de flotas, tracking de mercancías, etc.

- En los casos en los que otra tecnología celular más modesta proporciona cobertura similar. Caso del 2G para bienes de producción en zonas rurales (maquinaria, ganado, etc.).
- En situaciones en los que la cobertura celular es muy baja o inexistente, ya sea en 2G o LTE, en cuyo caso es más interesante valorar alternativas LPWAN de espectro no licenciado sobre topografías de red que emitan la señal del nodo hasta un Gateway con conexión a Internet.

A continuación, repasaremos algunos casos de uso en los que, actualmente, se aplica o puede aplicarse NB-IoT como tecnología de comunicación.

5.1. Proyecto “Predicción de radiación solar a corto plazo”.

- *Situación actual*

Se trata de un proyecto desarrollado desde el Dpto. de Arquitectura de Computadores y Automática de la UCM y referenciado en la sección de Bibliografía [26].

En su definición, se subraya la necesidad de contar con modelos de predicción de energía solar basados en datos reales obtenidos en tiempo real, citando los siguientes objetivos:

- Predicción a corto plazo de la irradiación solar que tendremos en un lugar concreto.
- Precisión temporal: queremos saber lo que ocurrirá en los próximos minutos (hasta 1-2 horas).
- Precisión espacial: queremos tener una precisión en la predicción de menos de 100 m².

En su desarrollo se ha planteado una red de nodos con sensores de irradiación solar, donde cada uno de ellos muestrea la radiación y envía los datos en tiempo real a un servidor, donde son procesados con un modelo predictivo para el área geográfica analizada.

Las especificaciones definidas fijadas para el nodo IoT fueron las siguientes:

- Bajo consumo y autonomía energética (panel solar)
- Bajo coste de los componentes
- Conectividad LPWAN

Resultando un prototipo con las siguientes características:

UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
Prototipo nodo UCM



- Basado en placa de desarrollo LoPy (Pycom)
- Incorpora sensores de temperatura, humedad, radiación solar (y GPS)
- Comunicación nodo – servidor usando LoRa®

Fig. 5.1. Prototipo Radiación Solar UCM

El proyecto de “Predicción de Radiación Solar” puede servirnos para poner en práctica los conocimientos adquiridos en este TFM, de modo que sea factible valorar cuáles serían las ventajas e inconvenientes a la hora de sustituir una tecnología LPWAN como LoRa, de espectro no licenciado, por otra como NB-IoT, del licenciado.

A las características de la tecnología LoRa explicadas en el punto 2.3 de este documento, el proyecto de “Predicción de Radiación Solar” fija sus limitaciones para el caso de uso en estos términos:

- experimenta grandes latencias en función de la distancia del nodo al *gateway*, donde es complicado reducir las tasas de muestreo a cerca de un segundo
- tiene restricción por el uso de espectro no licenciado: Duty cycle < 1%
- *Evolución a NB-IoT*
En la propuesta de evolución hacia NB-IoT, el equipo de desarrollo definió las siguientes fases, que servirían de apoyo en la valoración de costes y oportunidades a la hora de migrar de LoRa a NB-IoT:
 - Medir latencia, ancho de banda y consumo energético para distintos escenarios
 - Estudiar la facilidad de su integración en el entorno ya creado, actualmente basado en una red nodos/Gateway, relacionados con broker MQTT

- *Conclusiones*

En base a las pruebas de campo y laboratorio realizadas, utilizar NB-IoT en el caso de uso “Predicción de Radiación Solar” tendrá las siguientes ventajas e inconvenientes:

1. Ventajas

- a. Los datos analizados en cuanto a latencia son realmente competitivos respecto a los de LoRa.
- b. Carece de las restricciones del “duty cycle <1%” propias del espectro no licenciado.
- c. El servicio de comunicación está basado en las infraestructuras LTE de las operadoras telefónicas, que ofrecen plataformas de seguimiento de nuestras SIMs, y garantizan la seguridad, cobertura y la calidad de servicio contratadas.
- d. Estructura de red “No ad-hoc”, al venir dada por la operadora. La información fluye directamente desde cada dispositivo a la nube, sin necesidad de un Gateway que aglutine y suba del dato de todos los que conforman la red. Esto hace que el planteamiento de la arquitectura de red sea más robusto y el del dispositivo más independiente.
- e. El coste de la placa de desarrollo para NB-IoT es muy similar al utilizado con LoRa. Además, son del mismo fabricante.
- f. Los programas desarrollados, tanto para cliente (dispositivo) como servidor (nube), son sencillos y codificados en el mismo lenguaje que los existentes para LoRa: Micro Python.

2. Inconvenientes

- a. En el caso de negocio, hay que contemplar el coste de cada SIM NB-IoT, que en la modalidad “pack de evaluación Vodafone”, asciende a 5 euros por SIM el semestre (1,20 € al mes por SIM).
- b. La tecnología NB-IoT se apoya en el protocolo de transmisión UDP, lo que imposibilita el uso directo de un bróker MQTT para gestionar la publicación del dato de los dispositivos. Habrá que definir una solución sobre el protocolo CoAP^[36] o una alternativa que amplíe el programa python realizado en el servidor, manteniendo “socket-UDP” en su función de recepción del dato, pero ampliando la funcionalidad con una distribución sobre MQTT.

5.2. Otros casos de uso.

Siempre tras realizar un minucioso estudio del caso de negocio, del entorno en el que se aplica, así como de la fuente del dato a obtener, por sus características la aplicación de NB-IoT puede ser idónea en proyectos similares a los siguientes:

Smart Harbour.

Control y seguimiento de las dinámicas de producción en las infraestructuras de un puerto.

Resultará de interés tener localizados y poder organizar las tareas en elementos del puerto claves a la hora de dar servicio. Por citar algunos:

- Remolcador de buques.
- Equipos humanos de amarre
- Equipos de descarga de mercancías. Humanos y maquinaria: plataformas, contenedores, carretillas, transbordadores, etc.
- Enlace con empresas de transporte (ferrocarril, carretera, aeropuerto)

Smart Shipyard

El Astillero 4.0 se define por amplias zonas de trabajo, con muchas interferencias provocadas por grandes estructuras metálicas, donde soluciones del espectro no licenciado flaquean en su desempeño, siendo NB IoT, o un LTE-M privado si se justifica, las soluciones más recomendables.

Smart Farm

En aquellas instalaciones en las que las mediciones deben ser muy frecuentes, sumado a un volumen de información elevado por conectar con un amplio abanico de sensores.

Para el control de constantes vitales del ganado vacuno estabulado, el seguimiento de condiciones ambientales en espacios confinados como bodegas o almacenes subterráneos, etc.

Mettering

En todo lo relacionado con dispositivos de medida de servicios urbanos o industriales: contadores de gas, agua o electricidad desplegados en redes subterráneas y de poca cobertura.

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones y recomendaciones

A fecha de presentación de este TFM, y ciñéndonos a sus resultados y la experiencia adquirida en el proceso, la primera alternativa para abordar un proyecto NB-IoT sería la solución de conectividad de Vodafone, exponiéndoles la propuesta concreta y negociando los costes económicos relativos a su servicio.

Es importante el hecho de que, al contrario que Telefónica, Vodafone haya dispuesto de una amplia red operativa que, en tiempo de pruebas, ha satisfecho las necesidades de conectividad sin restricción geográfica (cuando menos, en área urbana).

En cualquier caso, y como buena práctica a seguir en todo proyecto I.T., resultará interesante contar con una valoración técnica y económica de varios proveedores de servicio, por lo que mi recomendación sería ampliar nuestro contacto a Telefónica y Orange.

Respecto al Nodo IoT, la placa de desarrollo Pycom ha dado resultados muy satisfactorios. Su entorno de programación en Python sobre el IDE de Atom ha resultado cómodo y eficaz. Sus costes y consumos son moderados. Sin embargo, estas variables, así como las ventajas de actualización y seguimiento remoto desde un PaaS, pueden verse mejoradas con alternativas como la ESP32 de Espressif, que, montando el mismo chip de comunicación, es una placa homologada por AWS IoT para Amazon FreeRTOS, lo que proporciona ventajas de la plataforma en cuanto a seguridad y actualización del firmware en remoto para miles de dispositivos.

El protocolo UDP sobre el que se apoya NB-IoT nos aleja de una solución MQTT para distribuir el dato. Serán necesarias las alternativas ya comentadas sobre CoAP o adaptaciones a MQTT en el código de nuestro programa servidor.

En lo referente a la arquitectura planteada, para un proyecto más ambicioso en el que figura un despliegue de decenas o centenares de dispositivos, habrá que diseñar una solución de plataforma de aprovisionamiento y gestión escalable. Ésta puede ser propietaria, desarrollada con librerías *open-source* (Fiware, por ejemplo), o bien por suscripción, un PaaS como el de Microsoft Azure IoT Central o AWS IoT Core.

Sea cual sea la alternativa elegida, debe aportar un método de alta, seguimiento y actualización de los dispositivos de nuestro proyecto de forma remota y segura.

6.2. Futuras líneas de investigación

- Repetir test en los que los “picos de tiempo” altos han sido más frecuentes, aplicando servicio de VPN, de modo que podamos deducir si el motivo se encuentra en la elevada longitud del *payload* u otro, ajeno a nuestros planteamientos técnicos.
- Comparativas con otras soluciones de hardware para el nodo IoT.
- Incluir en el estudio las soluciones IoT de otras operadoras (Orange).
- Realizar seguimiento de la evolución en la madurez del servicio de Telefónica, observando el grado de mejora en sus resultados.
- Ampliar estudios de consumo de energía a placas que implementan el chip SARA-R410M de uBlox, programables en C, más compactas y energéticamente más eficientes al no requerir placas de expansión como la Pysense.
- Pruebas de la solución PaaS de AWS IoT, sobre su sistema operativo Amazon FreeRTOS para placas homologadas con SoC ESP32 (ejemplo: Espressif).

Introduction

Motivation

It was one of my first questions in the subject “Networks, Protocols and Interfaces” of the Master IoT: “*Will we see LPWAN solutions of the licensed spectrum, such as NB-IoT?*”.

Although negative, the reasoned response of Nacho Gómez focused me early to provide everything necessary so that, within my possibilities, this subject would have practical information on a technology as new as NB-IoT.

The course agenda developed in detail the main Wireless technologies in the IoT field for the non-licensed spectrum of frequencies. Both PAN and WAN gave us an idea of the wide range of possibilities to develop connectivity and architectures of future projects.

But, while demonstrating its virtues, limitations were evidenced in aspects of interference, security, service or latency.

In my opinion, it lacked a more robust solution for use cases in industrial sectors, in which 6LowPan or LoRaWAN show their deficiencies. Such is the case of infrastructure control in low coverage environments, such as water or gas meters in metering projects, or location of transport elements, such as wagons or trailers, in rural areas.

The recent standardization in 2017 of 3GPP for NB-IoT opened a great alternative in the licensed spectrum, adding to the advantages such as the low cost of the components, a wide coverage, the low consumption or the security of the network, the fact of being supported by the service and infrastructure of telecommunication companies already implemented internationally.

However, accessing such a recent technology was complicated for a teaching project, due to the fact that currently the commercial and technical teams of the operators fix their efforts mainly in industrial projects.

Likewise, carrying out an analysis of this technology on real tests in different situations and locations, outside the operators' laboratories, to demonstrate whether their commercial offer corresponds to a technical reality, became an interesting challenge within the TFM approach.

Unlike the analysis of alternatives in the unlicensed spectrum, where there is a marked autonomy, this study has required a fluid and sincere communication with the two telecommunications operators that have given us access to its NB-IoT network: Telefónica and Vodafone.

My professional situation, in which I develop IoT projects for clients from different industrial sectors, has been both a motivating element and an advantage to attract the

attention of these two telco operators, whose human teams have always given me selfless support.

Objectives y work organization

The main objective of the project is to know the maturity state of the NB-IoT cellular communication technology, included in the solutions for LPWA networks, and for which there are few references of real projects at the time of addressing the TFM.

The work starts from a theoretical exposition that describes the technical bases that support NB-IoT, its situation within the licensed radio frequency spectrum, as well as its relationship with other non-licensed spectrum technologies.

Since the main purpose is to observe their behavior in real use cases, after the technical description, we have identified the elements of hardware and software necessary to carry out data transfers between the IoT-node (Pycom) and a server in the cloud (Microsoft Azure).

Next, we defined the main variables that will be analyzed, the composition of the data submissions, their characteristics, the storage of the results logs, as well as the graphic panels that complete the study.

Once the technical inventory was completed, contact with telco operators was addressed to request access to their cellular technology. Both, Telefónica and Vodafone, provided the project with connectivity cards to their NB-IoT network and users accessing their service management platforms.

When hardware, software and infrastructure were operational, field tests began in different geographical locations within the metropolitan area of Madrid city, mainly indoors, since it is these spaces that characterize differentiating performances for this kind of technology.

The practical experience of the project provided sufficient knowledge to describe the implementation of NB-IoT in an IoT project in which LoRa is currently used as a communication technology: the "Short-term solar radiation prediction" project.

Finally, a set of conclusions about the suitability of NB-IoT use in Internet of Things projects are presented and, always based on the experimentation carried out, it is assessed which of the operators would have a more advantageous starting situation to accompany us in these projects.

Document structure

In its first chapters, with a theoretical approach, the technical characteristics of NB-IoT, its fit and relationship with other alternatives of the radio frequency scheme are

detailed, as well as the horizon of LPWAN alternatives where it coexists and can coexist as an IoT solution.

Following chapters focus on the practical part of the TFM: the description of the physical and logical means used, the variables to be observed in the test processes, as well as the description of the developments made to carry them finished.

Finally, they present the results and comparisons of the tests, their analysis and conclusions.

Conclusions and future work.

At the end of this TFM, and based on its results and the experience acquired in the process, the first alternative to address an NB-IoT project would be the Vodafone connectivity solution, exposing the specific proposal and negotiating the economic costs related to its service.

It is important that, unlike Telefónica, Vodafone has had a wide operational network that, in testing time, has satisfied the connectivity needs without geographical restriction (at least, in urban areas).

In any case, as a good practice to follow in any I.T. project, it will be interesting to have a technical and economic evaluation of several service providers, so my recommendation would be to extend our contact to Telefónica and Orange.

Regarding the IoT Node, the Pycom development board has given very satisfactory results. A Python programming environment on the Atom IDE has been convenient and efficient. Its costs and consumption are moderate. However, these variables, as well as the advantages of updating and remote monitoring from a PaaS, can be improved with alternatives such as ESP32 from Espressif (approved by AWS IoT).

The UDP protocol on which NB-IoT relies moves us away from an MQTT solution to distribute the data. The alternatives already mentioned on CoAP^[36] or adaptations to MQTT in the code of our server program will be necessary.

Regarding the architecture proposed, for a more ambitious project that includes a deployment of tens or hundreds of devices, a scalable provisioning and management platform solution will have to be designed. This can be proprietary, developed with open-source libraries (Fiware, for example), or by subscription, a PaaS such as Microsoft Azure IoT Central or AWS IoT.

The chosen alternative must provide a method of registering, monitoring and updating the devices of our project remotely and safely.

Glosario de términos

3GPP

El 3rd Generation Partnership Project es un grupo de asociaciones de estandarización de telecomunicaciones

- Se unieron para crear una especificación para la telefonía 3G evolucionando GSM
- Han desarrollado y mantenido
 - GSM 2G y 2.5G (GPRS y EDGE)
 - UMTS y estándares 3G (como HSPA)
 - LTE y estándares 4G
 - Futuras generaciones (5G)
- Publican Releases periódicos
 - Tras la salida de LoRa, Huawei y Vodafone presionaron al 3GPP para desarrollar una propuesta NarrowBand para IoT
 - En la Release 13 (Q1 2016) y 14 (Q2 2017) incluyen especificaciones para IoT

AT Commands

El conjunto de comandos Hayes es un lenguaje desarrollado por la compañía Hayes Communications que prácticamente se convirtió en estándar abierto de comandos para configurar y parametrizar módems. Los caracteres «AT», que preceden a todos los comandos, significan «Atención», e hicieron que se conociera también a este conjunto de comandos como comandos AT.

Bandas de frecuencia

“Son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones. Su uso está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y puede variar según el lugar. El espacio asignado a las diferentes bandas abarca el espectro de radiofrecuencia y está dividido en sectores.”

(fte. https://www.ecured.cu/Bandas_de_radiofrecuencia)

Bandwidth

Bandwidth can be defined as that range of frequencies that pass through a circuit with a voltage amplitude of at least 70.7 percent of the maximum output voltage—in other words, the range of frequencies between the two half-power points.

Banda ISM

ISM (Industrial, Scientific and Medical) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. En la actualidad estas bandas han sido popularizadas por su uso en comunicaciones WLAN (e.g. Wi-Fi) o WPAN (e.g. Bluetooth). Para conocer en detalle su desglose de frecuencias, ver el documento [17], pp. 93-94.

CNAF

<https://avancedigital.gob.es/espectro/Paginas/cnaf.aspx>

https://avancedigital.gob.es/espectro/CNAF/tablas_2017.pdf

“En España, el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias es la pieza básica que define la atribución o uso a que se reserva cada una de las bandas de frecuencia en las que se divide el espectro radioeléctrico disponible para radiocomunicaciones, entre 8,3 kHz y 3000 GHz. Este se publicó por primera vez en 1990 y es un documento que se actualiza constantemente para reflejar las novedades y cambios.” (fuente, ADSLZone)

CoAP Protocol

CoAP is an IoT protocol. CoAP stands for Constrained Application Protocol, and it is defined in RFC 7252. CoAP is a simple protocol with low overhead specifically designed for constrained devices (such as microcontrollers) and constrained networks. This protocol is used in M2M data exchange and is very similar to HTTP, even if there are important differences that we will cover later.

The main features of CoAP protocols are:

- Web protocol used in M2M with constrained requirements
- Asynchronous message exchange
- Low overhead and very simple to parse
- URI and content-type support
- Proxy and caching capabilities

(fue "CoAP Protocol: Step-by-Step Guide", Azzola, 2018 [36])

CSS (chirp spread spectrum modulation)

GPIO (General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General)

Se trata de un pin genérico para chip o un módulo, cuyo comportamiento (incluyendo si es un pin de entrada o salida) se puede controlar (programar) por el usuario en tiempo de ejecución.

Data Rate

Velocidad en la que un mensaje es transmitido. Se mide en bits-por-segundo.

Handover

Se denomina handover o traspaso (también handoff o transferencia) al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura. (fuente. Wikipedia, <http://panamahitek.com>)

Link budget

Link budget is a commonly used metric to evaluate the coverage of a cellular system in the downlink or uplink. In order to calculate the link budget, one must account for all gains and losses from the transmitter to the receiver over the air-interface.

Nomadic Wireless

Nomadic wireless is a network technology that provides wireless connectivity to devices via antennas in a limited area. In contrast to mobile, which means "on the go," the term nomadic refers to a semi-portable state.

NTP – Network Time Protocol

Protocolo para sincronizar varios relojes de red usando un conjunto de clientes y servidores repartidos. Como predecesores, se hace mención al mensaje ICMP Timestamp y al Time Protocol, ya que sus funciones fueron incluidas en el Network Time Protocol. El NTP se basa en el protocolo de datagramas de usuario (User Datagram Protocol o UDP), que permite enviar

datagramas sin que se haya establecido previamente una conexión. Es decir, utiliza UDP como capa de transporte usando el puerto 123..
(fte.: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/que-es-el-ntp/>)

Radio Resource Control

The Radio Resource Control (RRC) protocol is used in UMTS and LTE on the Air interface. It is a layer that exists between UE and eNB (eNodeB) and exists at the IP level. This protocol is specified by 3GPP in TS 25.331 for UMTS and in TS 36.331 for LTE. RRC messages are transported via the PDCP-Protocol (*packet data convergence protocol*).

The major functions of the RRC protocol include connection establishment and release functions, broadcast of system information, radio bearer establishment, reconfiguration and release, RRC connection mobility procedures, paging notification and release and outer loop power control. By means of the signalling functions the RRC configures the user and control planes according to the network status and allows for Radio Resource Management strategies to be implemented.

(fte.: “LTE-Advanced”, Ahmadi, 2014

<https://www.sciencedirect.com/book/9780124051621/lte-advanced>)

RTC

A real-time clock (RTC) is a computer clock (most often in the form of an integrated circuit) that keeps track of the current time. Although the term often refers to the devices in personal computers, servers and embedded systems, RTCs are present in almost any electronic device which needs to keep accurate time.

(fte. <https://learn.adafruit.com/ds1307-real-time-clock-breakout-board-kit/what-is-an-rtc>)

Implementación en Python. RTC – Real Time Clock

<https://docs.micropython.org/en/latest/library/machine.RTC.html>

Spread Spectrum

La técnica de espectro expandido (Spread Spectrum) consiste en la transformación reversible de una señal de forma que su energía se disperse entre una banda de frecuencias mayor que la que ocupaba originalmente.

El Spread Spectrum, ha sido generado y ampliamente utilizado en el sector de la defensa por sus excelentes propiedades en cuanto a inmunidad para las interferencias y a sus posibilidades de encriptación.

(fte.: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/83/1/CD-0055.pdf>)

Bibliografía

1. <https://blog.cnmc.es/2010/04/30/conceptos-basicos-de-telecos-espectro-radioelectrico/>
2. https://www.3gpp.org/news-events/1785-nb_iot_complete
3. CENAF <https://avancedigital.gob.es/espectro/Paginas/cnaf.aspx>
4. Registro público de concesiones
<https://avancedigital.gob.es/espectro/Paginas/registro-publico-concesiones.aspx>
5. <https://searchnetworking.techtarget.com/answer/Whats-the-difference-between-licensed-and-unlicensed-wireless>
6. <https://www.linkedin.com/pulse/licensed-vs-unlicensed-spectrum-parag-kar>
7. <https://www.adslzone.net/bandas-5G-4G-3G-2G-frecuencias-telefonía-móvil>
8. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8536384>
9. ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
<https://www.itu.int/es/pages/default.aspx>
10. UHF
<https://www.ecured.cu/UHF>
11. Vodafone NB-IoT
<https://www.vodafone.com/content/index/what/technology-blog/nbiot-commercial-launch-spain.html#>
12. Gobierno del espectro de radio europeo.
<http://www.europarl.europa.eu/EPERS/EPERS-Briefing-554170-Radio-Spectrum-FINAL.pdf>
13. <http://panamahitek.com/handover-en-telecomunicaciones-parte/>
14. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/channel-quality>
15. <https://www.linkedin.com/pulse/lte-dual-connectivity-zhou-hongwei/>
16. LoRaWAN: bandas de frecuencia
<http://www.3glteinfo.com/lora/lorawan-frequency-bands/>
17. Frecuencias de las Bandas ISM. (para espectro licenciado móvil y no licenciado, ver pp 93-94)
<https://www.ecodocdb.dk/download/2ca5fchd-4090/FRCREP025.pdf>
18. <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/7/htm>
19. <https://www.globbit.com/huawei-lanza-la-primer-solucion-comercial-narrow-band-iot-basada-en-la-release-14-del-3gpp-12732/>
20. “[A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT](https://www.researchgate.net/publication/315505158_A_survey_on_LPWA_technology_LoRa_and_NB-IoT)”, Sinha, Rashmi and Yiqiao, Wei and Hwang, Seung-Hoon, 2017)
https://www.researchgate.net/publication/315505158_A_survey_on_LPWA_technology_LoRa_and_NB-IoT
21. “[Overview of LPWAN technologies: Sigfox, LoRa, and NB-IoT](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8444317)”, Mekki ; Bajic ; Chaxel, Meyer, IEEE Explore 2018
22. <https://www.wiley.com/en-us/Evolved+Packet+System+%28EPS%29%3A+The+LTE+and+SAE+Evolution+of+3G+UMTS-p-9780470059760>
23. Payload length
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>
24. (...) NB-IoT allows the transmission of data of up to 1600 bytes. LoRa allows a maximum of 243 bytes of data to be sent. In contrary, Sigfox proposes the lowest payload length of 12 bytes, which limits its utilization on various IoT applications that need to send large data sizes.”
25. Librerías desarrolladas para los test de este TFM
<https://github.com/dsrosado/NB-IoT>
26. “[Predicción de radiación solar a corto plazo](https://repositorio.ub.edu/retrieve.htm?objectid=44667)”, Aragón Moreno, Pablo y Castañeda López, María y Coronado López, Abel UCM, 2017 (<https://repositorio.ub.edu/retrieve.htm?objectid=44667/>).
27. RACH en NB-IoT
https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_NB_rach.html
28. AT Commands
<https://m2msupport.net/m2msupport/atcsq-signal-quality/>
29. http://www.gsm-modem.de/M2M/m2m-faq/comparison_tx-energy-consumption-across-lpwan-using-12-bytes-nb-iot-lorawan-sigfox/
30. <https://www.linkedin.com/pulse/nb-iot-versus-other-lpwan-technologies-harald-naumann>

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

31. <https://discuss.atom.io/t/how-do-i-uninstall-atom-on-macos/56064>
32. <https://www.fiware.org/>
33. https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2017/12/NB-IoT-Commercial-Premier-Use-case-Library-1.0_Layout_171110.pdf
34. <https://www.ipv6.com/general/udp-user-datatype-protocol/>
35. <https://forum.pycom.io/topic/2704/gpy-mqtt-azure/2>
36. CoAP Protocol: Step-by-Step Guide
(<https://dzone.com/articles/coap-protocol-step-by-step-guide>)
37. <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2012/11/ofcom-plan-for-future-5g-mobile-broadband-and-700mhz-spectrum-release.html>
38. <http://www.iot.org.au/wp/wp-content/uploads/2016/12/IoTSpectrumFactSheet.pdf>
39. <https://blog.mobile-network-testing.com/market-technology-trends/evolving-technologies/nb-iot-carriers-spectrum/>
40. IOT Battery Life Calculator
<http://www.of-things.de/battery-life-calculator.php>
41. Especificaciones pilas de botón
<http://www.javiergutierrezchamorro.com/especificaciones-de-las-pilas-de-botón/1991>
42. Estado “durmiente” en la GPY
<https://docs.pycom.io/pytrackpysense/apireference/sleep.html>
43. “Understanding the limits of LoRaWAN”, Adelantado, Vilajosana. IEEE Magazine 2017
<https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>
44. “Exploring the performing boundaries of NB-IoT”, Martinez, Adelantado, IEEE Magazine 2019
<https://arxiv.org/pdf/1810.00847.pdf>
45. <https://www.rs-online.com/designspark/what-i-learned-about-iot-and-cellular-from-ae-cloud2>
46. Baterías AA recargables. Amazon
<https://www.amazon.es/Duracell-2500mAh-precargadas-bater%C3%ADas-recargables/dp/B017MAZ9EW/>
47. Plataforma NB-IoT de Orange con capa de conexión a MQTT
<https://www.hackster.io/frederik-de-swaef/connecting-a-nb-iot-device-to-an-mqtt-client-0ee20b>

Anexos

1. Comprobación real del máximo payload por envío admitido en NB-IoT.

Se preparó un envío con un payload de longitud 1.600 bytes, que fue recibido correctamente en el servidor UDP. Por encima de dicha cantidad, el socket quedaba abierto, pero no se recibía ninguna información desde el Nodo.

El tiempo de envío para un payload de longitud 1.600 bytes fue de 10,46 s. (152 b/s)

```
main.py                         main_attcommands.py          rtc.py                           prosleep.py
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71 # Realizamos 5 tandas de 10 envíos cada una, 1 tanda cada 1 segundos
72 str99 = "00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000" # 99 bytes
73 str1024 = ""
74 for i in range(28):
75     str1024 = str1024 + str3
76
77 bytes50 = "00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000" # para llegar a 150 bytes
78 bytes79 = "00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000" # Al sumarlos a mymensaje son 100 bytes
79 for i in range(1):
80     for j in range(2):
81         # mymensaje= str(i) + " " + str(j) + "#"
82         # mymensaje= bytes50 + str(i) + " " + str(j) + "#"
83         # mymensaje= bytes50 + bytes79 + str(i) + " " + str(j) + "#"
84         mymensaje= str1024 + str(i) + " " + str(j) + "#"
85         send_UDP_socket(mymensaje)
86         time.sleep (1)
87     #time.sleep(1)
88
89 BUFFER_SIZE = 2048 #100 #1024
90
91 lte = LTE()
92 UDP_IP = '52.232.39.250'
93 UDP_PORT = 8080 #5005
94 sock = socket.socket(socket.
95                      socket.AF_INET,
96                      socket.SOCK_DGRAM)
97 print("Socket abierto!")
98 main()
99
100
101 Connected! FlipModemFirmware
102
103 not attached! 6
104 not attached! 7
105 not attached! 8
106 Attached!
107 Connected!
108
109 1563288710.39 ; 39.558521
110 1563288721.1 ; 50.219509
111
112 Pycom MicroPython 1.18.1.r7 [v1.8.6-849-dic5e9]
113 Type "help()" for more information.
114 >>>
```

Fig. A.1. Envío máximo permitido para UDP: 1.600 bytes

2. Envío de datos entre un host-servidor y una GPY

Descripción de la necesidad: Ampliar las capacidades escasas de cálculo y sensores del módulo GPY/Pysense.

La necesidad de ejecutar procesos complejos, tales como pre procesamiento y unificación de datos, analítica de campo (*stream analytic*), *machine learning*, así como de utilizar otra gama de sensores y actuadores diferente a la integrada en el propio módulo GPY, hace recomendable la ampliación de la arquitectura del nodo IoT:

- con un dispositivo inteligente (Smart thing) desarrollado ad-hoc para el caso de uso, capaz de realizar cálculos complejos (identificación de caras, interpretación de matrículas, lectura de etiquetas RFID, etc.);

- un módulo de conectividad (en este caso NB-IoT), que proporcione a cada Smart-thing de un enlace de radio frecuencia entre él y su Gateway concentrador;
- un Gateway concentrador que pueda realizar el pre-procesado de la información relevante recibida desde cada uno de los dispositivos inteligentes, la pre-elabore, decida posibles alertas de campo y la envíe a la nube por medio del módulo de conectividad.

Tengamos en cuenta, que tanto dicho módulo como su placa de desarrollo (*development board*) están pensados para procesos ligeros de captura y envío de datos recogidos por sus sensores integrados. La ventaja es clara: ahorro de energía y simplicidad de arquitectura (MCU y Módem).

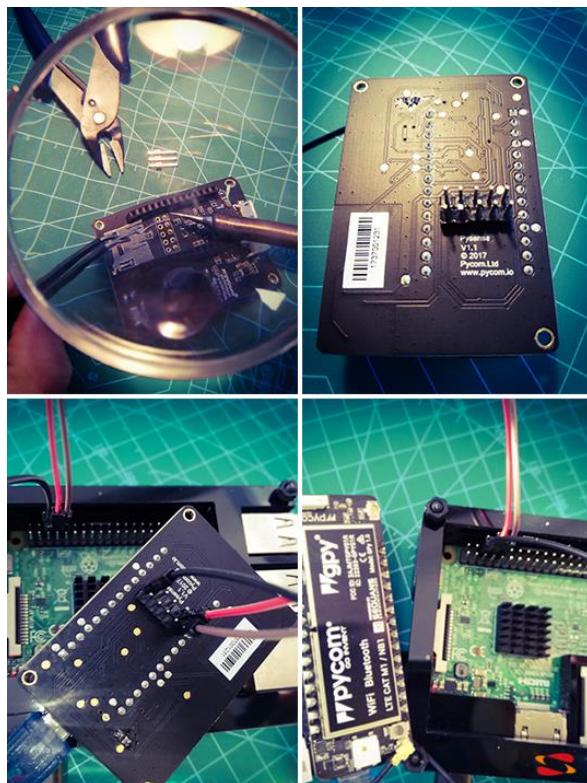


Fig. A.2. Conexión GPY y Raspberry

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

The screenshot shows a terminal window with several tabs open. The tabs include 'main.py', 'pru_receivefromrp1.py', 'rtc.py', and 'pruGPS0'. The 'pruGPS0' tab displays a series of 'Data Sent' messages from a Raspberry Pi (RPi) to a GPY module. The RPi's command history shows it running 'pru_receivefromrp1.py' and sending data to the GPY module using 'sudo python3 send2pycom.py'. The GPY module's response is visible in the 'pruGPS0' tab, showing 'Data Received' messages. The terminal also shows standard Linux system logs and a Python script for sending data.

Fig. A.3. Envío de información entre RPi y GPY, vía puerto serie

3. Sincronización del valor de tiempo en modulo y cloud

Al no contar con batería permanente, los módulos de desarrollo como los de Pycom no cuentan con el dato de fecha/hora actualizado. Esta información es necesaria para los análisis de este TFM, principalmente para registrar los tiempos de conectividad entre el módulo y la nube a la que se envían los paquetes de prueba.

Para realizar la sincronización mediante ntp, es necesario contar con conexión a internet en la GPY. Para ello, hemos utilizado su conectividad WiFi.

El problema radica en que `time.time()` de Micropython no almacena los microsegundos, imprecisión que nos impide comparar tiempos de salida de la trama con los de su llegada al cloud de Azure.

Para solventarlo, sumamos los microsegundos de `rtc.now()`, que sí los conserva, a los segundos de `time.time()`, siendo el valor total el que enviamos con el paquete de salida.

Una vez llegada al servidor, podremos restar el valor time del envío con el de la máquina que lo recibe, obteniendo una medida precisa del tiempo transcurrido durante el envío.

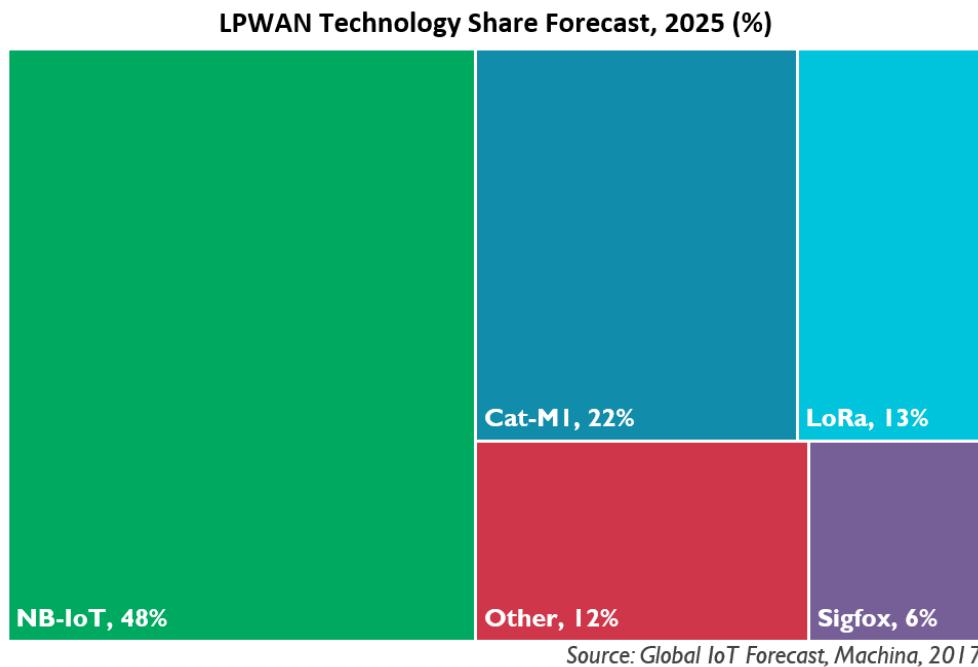


Fig. A.4. Previsión de cuota de mercado para tecnologías LPWAN en 2025

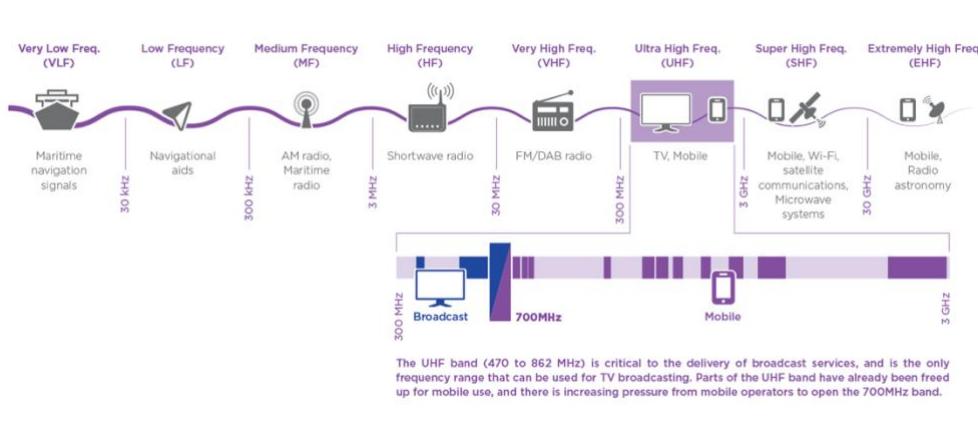


Fig. A.5. Espacio de radio frecuencias: UHF en la banda de los 700 a 3 Ghz
(fuente: <https://www.ebu.ch/legal-policy/spectrum>)

NB-IoT. Tecnologías celulares narrow-band

Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone

3GPP Release 13 NB IoT Frequency Band Details :

NB Band	Uplink (UL) Operating Band BS Receive / UE Transmit $F_{UL_low} - F_{UL_high}$	Downlink (DL) Operating Band BS Transmit / UE Receive $F_{DL_low} - F_{DL_high}$	Duplex Mode
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
B5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	HD-FDD
B8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 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
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
B26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	HD-FDD
B28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	HD-FDD
B66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	HD-FDD

Fig. A.6. Bandas de frecuencia fijadas por 3GPP para NB-IoT (las enmarcadas corresponden a Europa)
(fuente <http://www.techplayon.com/nb-iot-frequency-bands-as-per-3gpp-rel-13-14-and-15>)

	Europe	North America
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz
Channels	10	64 + 8 +8
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz
Channel BW Dn	125kHz	500kHz
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm
SF Up	7-12	7-10
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps
Link Budget Up	155dB	154dB
Link Budget Dn	155dB	157dB

Fig. A.7. LoRaWAN, bandas de frecuencia.

(fuente: <http://www.3glteinfo.com/lora/lorawan-frequency-bands/>)

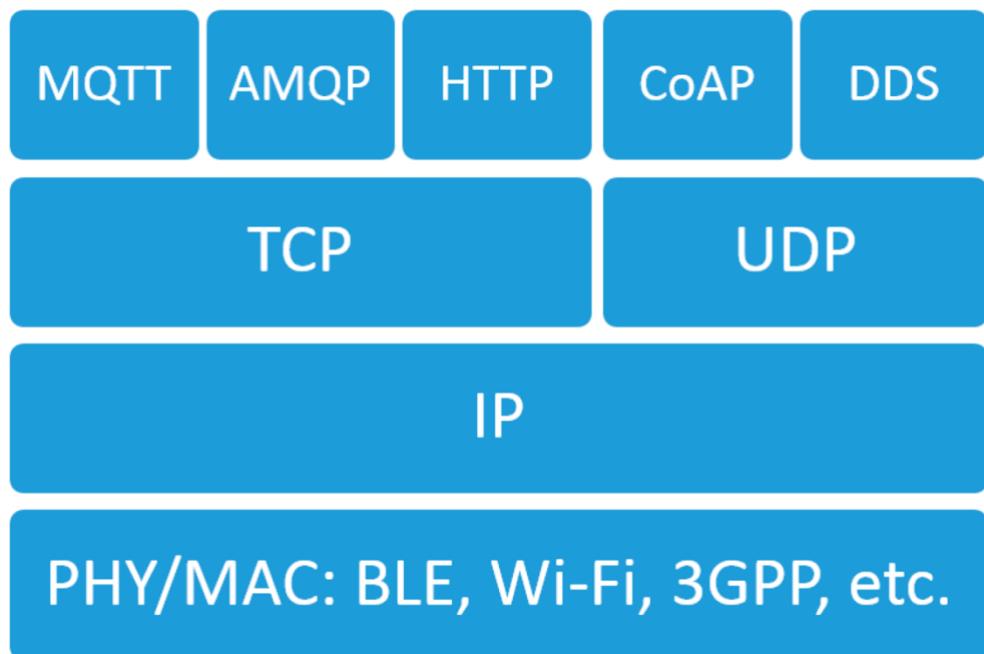


Fig. A.8. Protocolos capa de aplicación para TCP y UDP
(fuente: https://www.mdpi.com/sensors/sensors-19-00007/article_deploy/html/images/sensors-19-00007-g001-550.jpg)