

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA INTERNET DE LAS COSAS

Gabriela Beatriz Pereyra Rodríguez, Claudina Isabel Rattaro Eugui, Benigno Rodríguez Díaz

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 11300
Montevideo, Uruguay

e-mail: pereyra.gab@gmail.com, crattaro@fing.edu.uy, benigno@fing.edu.uy

RESUMEN

En este trabajo se analizan tres tecnologías actualmente utilizadas para Internet de las Cosas (IoT): NB-IoT, LoRa y IEEE 802.15-4. Particularmente se analiza cómo estas tecnologías cumplen con los requisitos para el tráfico de IoT, teniendo en cuenta tres criterios: cobertura, capacidad de dispositivos, confiabilidad, retardo y consumo energético; características clave a la hora de evaluar una solución para este tipo de tráfico. Se comparan capacidades y se muestran compromisos entre los distintos parámetros a analizar, concluyendo sobre la aplicabilidad de las mismas de acuerdo a los requerimientos de las aplicaciones de IoT. Para aquellas que requieran alta confiabilidad y buena cobertura sin requerimientos fuertes en tasa de datos y retardo, NB-IoT resulta ser la mejor opción para un operador que tiene infraestructura LTE ya desplegada.

PALABRAS CLAVES: IoT, NB-IoT, LoRa, IEEE 802.15-4, LPWAN.

TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES FOR INTERNET OF THINGS

ABSTRACT

In this work, three current used technologies for Internet of Things (IoT) are analyzed: NB-IoT, LoRa and IEEE 802.15-4. The analysis covers mainly how these technologies meet with the following criteria: coverage, connected devices, reliability, delay and power consumption requirements for IoT traffic. The presented study also includes a capacity comparison and shows the tradeoff between a variety of parameters considered in the analysis. The study also concludes about these technologies usability according to IoT applications requirements. For high reliability and good coverage applications without strong constraints in bitrate and delay, NB-IoT turns to be the better option for an operator with an LTE network already deployed.

KEY WORDS: IoT, NB-IoT, LoRa, IEEE 802.15-4, LPWAN.

1. INTRODUCCIÓN

Internet de las cosas es el término utilizado comúnmente para referirse al concepto de que buena parte de las cosas que conocemos puedan conectarse a la red. Desde dispositivos para uso textil, accesorios, electrodomésticos, sensores, cámaras de seguridad, automóviles, etc.

En este contexto, las redes del futuro deberán prepararse para soportar el tráfico de una enorme cantidad de dispositivos, con distintas necesidades de conectividad de acuerdo a la aplicación que los maneja. Si bien este tipo de tráfico puede abarcar una gran variedad de perfiles, destaca particularmente el tráfico de dispositivos que transmiten pequeños paquetes de forma esporádica.

Hasta ahora las tecnologías más conocidas en el mundo inalámbrico, como ser LTE [1], WIFI [2], WiMAX [3] etc, han tenido como objetivo maximizar el throughput de usuario, sobre todo en el enlace descendente (DL), respondiendo a la creciente tendencia de tráfico de servicios como por ejemplo streaming de video. Sin embargo, en los próximos años se espera tener un gran crecimiento en el tráfico de aplicaciones de IoT, debido a un gran crecimiento en la cantidad de dispositivos conectados. Particularmente, 3GPP está estandarizando una nueva interfaz de radio y un nuevo núcleo de red de acuerdo a los requerimientos dictados por la ITU en IMT-2020 [4] para lo que se conoce como 5G. Esta nueva tecnología se está diseñando teniendo en cuenta los distintos tipos de tráfico que van a tener que convivir y compartir recursos en las redes de los próximos años, considerando el tráfico de IoT como parte de los casos de uso objetivo.

Bajo este contexto, respondiendo a las necesidades actuales, han surgido varias tecnologías de radio orientadas específicamente al tráfico de diversas aplicaciones de IoT. Zigbee con capa física y MAC definidas por el estándar IEEE 802.15.4 [5], es una tecnología ya con varios años en el campo de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), probablemente una de las primeras en diseñarse para los requerimientos de este tipo de tráfico. Si bien está pensada para redes de alcance local, permite construir redes con distintas topologías que tienen la capacidad de adaptarse a los cambios de forma dinámica.

El estándar 802.15.4 presenta una base muy firme para este tipo de aplicaciones, con amplio desarrollo en los últimos 15 años y variedad de optimizaciones para mejorar su rendimiento. Sin embargo, en los últimos tiempos han ganado popularidad las tecnologías de mayor alcance con topología tipo estrella, como en las redes celulares actuales, debido a su simplicidad. Este tipo de redes para aplicaciones de IoT entran dentro de lo que se denomina Red de Área Extendida de Bajo Consumo (LPWAN). Dentro de este grupo, una de las tecnologías más relevantes es LoRaWAN [6], que provee una solución para este tipo de tráfico utilizando espectro no licenciado. Otra de las tecnologías más relevantes en el grupo de las LPWAN es NB-IoT [1], una de las soluciones 3GPP para el tráfico IoT. Esta última es básicamente una optimización de LTE para el tráfico IoT y brinda una solución relativamente transparente y económica para los operadores que ya tienen una red LTE desplegada y quieren incluir el tráfico IoT a la misma minimizando el impacto en los servicios existentes.

Si bien todas estas tecnologías fueron diseñadas para minimizar el consumo de los dispositivos, existen diferencias con respecto al desempeño que presentan en el resto de los parámetros a evaluar, esto es, cobertura, capacidad de dispositivos conectados, confiabilidad y retardo, relacionadas al diseño de cada una. Hasta el momento hay varios trabajos orientados a analizar el desempeño de cada una de las tecnologías estudiadas. También se puede encontrar trabajos en los que se comparan las capacidades de varias de estas tecnologías, más que nada a nivel teórico en el caso de NB-IoT, dado que es una tecnología estandarizada hace muy poco tiempo. Con este trabajo se busca más allá de comparar las tecnologías, analizar distintos aspectos de las mismas de forma más bien cualitativa, a los

efectos de entender su aplicabilidad para los casos de uso de IoT. Notar que 802.15-4 se incluye en el análisis debido a su aporte en el desarrollo de IoT, a pesar de que no es comparable de forma directa con el resto ya que fue pensada para operar con otro tipo de topología y alcance.

El presente trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2 se describen brevemente los principales aspectos de las tres tecnologías estudiadas. En la Sección 3 se analizan las formas y el grado en que cada una cumple con los requerimientos para el tráfico de IoT. Finalmente en la Sección 4, se concluye el trabajo de acuerdo al análisis realizado.

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

A continuación, se describen brevemente cada una de las tecnologías analizadas en este trabajo principalmente en cuanto a cómo se asignan los recursos a los dispositivos (capa MAC).

IEEE 802.15-4

El estándar IEEE 802.15-4 define la capa física y MAC para redes de sensores inalámbricos de corto alcance. A nivel de topología se definen 2 posibilidades como base: estrella o entre pares y la posibilidad de formar grupos como combinación de las anteriores. En el primer caso la comunicación se establece entre dispositivos y un coordinador central denominado coordinador PAN. En el segundo también hay un coordinador PAN. Sin embargo, cualquier par de dispositivos puede comunicarse de forma directa siempre que sean alcanzables entre ellos (a nivel de cobertura). Este tipo de topología permite la comunicación entre dispositivos distantes vía múltiples saltos. Una característica notable de estas redes es que pueden adaptarse a los cambios de topología que pudieran ocurrir gracias a los procedimientos de asociación previstos por el estándar. Esto brinda mayor robustez a la red.

Si bien la última versión del estándar presenta variedad de posibilidades para la capa física, las más comúnmente utilizadas (por ejemplo, por Zigbee) son: la modulación Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) en conjunto con la técnica de transmisión de Espectro Expandido de Secuencia Directa (DSSS) en las bandas 780 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2380 MHz y 2450 MHz y la modulación BPSK con DSSS en las bandas 868 MHz y 915 MHz [5]. A nivel de despliegue lo más común es usar la banda de 2.4 GHz, en la cual se definen canales de 5 MHz para la transmisión. La capa física se encarga de la activación y desactivación del radio, detección de energía, indicación de calidad del enlace, selección del canal y la transmisión y recepción de los paquetes por el medio físico.

La subcapa MAC ofrece 2 servicios, el de datos (para la transmisión y recepción de MPDUs mediante los servicios de la capa física) y el de gestión. Algunas de las funcionalidades provistas por esta subcapa son: la gestión de las balizas (beacon), el acceso al canal, la gestión de los recursos garantidos, la validación de la trama, el envío de tramas con reconocimiento, la asociación y des-asociación.

En cuanto al acceso al medio, existen 2 modos: con balizas no habilitadas, o con balizas habilitadas. En el primer caso los dispositivos simplemente utilizan CSMA/CA para acceder al medio cuando lo necesiten. En el segundo, las transmisiones se realizan en intervalos de tiempo indicados por la emisión de balizas por parte del coordinador. Las balizas se usan

para sincronizar los dispositivos conectados, identificar la PAN y describir la estructura de la super-trama. En la Fig. 1 se puede ver la estructura temporal definida por el estándar.

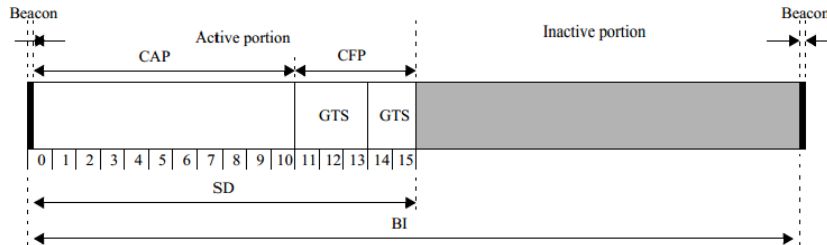


Figura 1: Ejemplo de estructura temporal para el modo con balizas habilitadas (fuente[5]).

Cualquier dispositivo que intente comunicarse durante el período de acceso con contención (CAP) compite con otros dispositivos usando CSMA-CA ranurado. El coordinador puede dedicar porciones de la super-trama para aplicaciones de bajo retardo o que requieran un ancho de banda específico, denominadas GTS (Guaranteed time slots). Estos GTS constituyen el período libre de contención (CFP), que se encuentra siempre al final de la super-trama, luego del CAP. El coordinador puede asignar hasta 7 GTS, pudiendo ocupar cada uno más de un slot. Sin embargo, se mantiene una porción suficiente de la trama para el acceso basado en contención, para permitir otras transmisiones. Todas las transacciones de este tipo terminan antes de que comience el CFP y todos los dispositivos que transmiten usando GTS se aseguran de que sus transacciones se completen antes de que comience el próximo GTS o termine el CFP. Tanto la duración del BI, de la super-trama, del CFP y los GTS son configurables.

A su vez, para el acceso por contención se definen otros parámetros para configurar los períodos y la cantidad de veces que el dispositivo difiere la transmisión al detectar el canal ocupado (backoff), así como la cantidad de retransmisiones posibles antes de definir que hay una falla de comunicación. Si bien el estándar presenta valores por defecto para estos parámetros, hay posibilidad de optimizarlos de acuerdo a los requerimientos de la aplicación, lo que le da un amplio margen de versatilidad a la tecnología frente a distintos requerimientos.

LoRa

Las redes LoRa constituyen una opción para ofrecer buenos niveles de cobertura a dispositivos IoT, usando el espectro no licenciado. El término LoRa hace referencia a la capa física utilizada en estas redes, que es propietaria y se basa en la modulación de Espectro Expandido vía Chirp (CSS). A nivel de capas superiores la tecnología se conoce como LoRaWAN, es un desarrollo abierto, descrito en documentos accesibles en la web.

La idea de CSS es extender en frecuencia la información modulando la señal con una sinusoidal de frecuencia variable linealmente con el tiempo (chirp) [7]. Esta distribución uniforme del símbolo en un ancho de banda mayor hace que la señal sea más robusta ante ruido e interferencia selectivos en frecuencia, a costa de perder eficiencia espectral. Si la banda de transmisión B se encuentra entre f_0 y f_1 , un chirp se construye aumentando

linealmente la frecuencia desde f_s (perteneciente a B) a la misma frecuencia saltando de f_1 a f_0 al llegar al final de la banda.

En LoRa, f_s se usa para representar el símbolo y la cantidad de bits por símbolo es un parámetro configurable, llamado Factor de Dispersión (SF) ya que es también el Factor de Dispersión que se le aplica a los bits de cada símbolo a transmitir. Hay 2^{SF} valores posibles para f_s . A su vez, SF determina también la duración del símbolo como $2^{SF}/B$. Si B es fijo, un incremento del SF en 1 genera símbolos del doble de duración. Por otra parte, un incremento del ancho de banda aumenta la tasa a la que los chirps se transmiten y por ende el bitrate de la modulación. Un incremento en la duración del símbolo aporta mayor robustez ante el ruido o la interferencia, aunque SF altos generan muchos símbolos posibles, aumentando la posibilidad de errores. A su vez, otra desventaja de transmitir símbolos más largos es el aumento en la probabilidad de colisiones. La elección del SF también impacta en la sensibilidad en recepción. Una característica notable de esta modulación es que diferentes SF son pseudo-ortogonales, incluso partiendo de la misma f_s y usando el mismo ancho de banda. Esto permite que en recepción se puedan detectar correctamente los paquetes que usan un SF aunque se solapen en tiempo con otras transmisiones que usen otro SF distinto.

En cuanto a las frecuencias a utilizar, como se mencionó antes, LoRaWAN está pensado para operar las bandas ISM, en particular, en Estados Unidos en la banda 902 – 928MHz y en Europa en la banda 863 – 870 MHz, que si bien no son licenciadas, son reguladas. Esto quiere decir que los radios deben operar en modo escuchar antes de hablar (LBT), o respetando ciclos de trabajo definidos, limitando la tasa de transmisión de mensajes.

En la Fig. 2 se puede ver la topología típica de estas redes. Los terminales (ED), son los dispositivos que envían/reciben mensajes de forma inalámbrica al/desde uno o más enrutadores (GW), que los reenvían a/desde un Servidor de Red (NS) vía enlaces de alta capacidad y confiabilidad. Los ED simplemente envían los mensajes por el canal inalámbrico asumiendo que por lo menos un GW los recibirá y reenviará al NS. El NS filtrará los paquetes duplicados y elegirá el GW más apropiado para enviar los mensajes DL al dispositivo. Para hacer más robusta la red a la interferencia, se definen múltiples canales para toda la red y los dispositivos que necesiten transmitir accederán a uno de forma pseudo-aleatoria. Notar que sólo hay capa de aplicación entre ED y NS, los GW son totalmente transparentes a la aplicación.

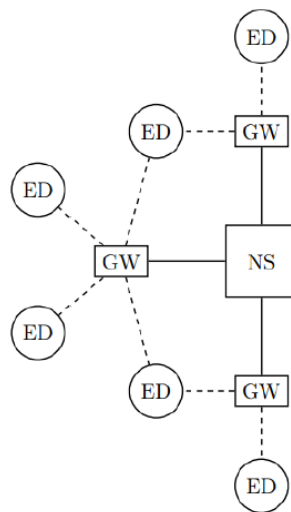


Figura 2: Topología típica LoRaWAN (fuente [7]).

En [6] se definen 3 clases para el ED de acuerdo a sus necesidades y requisitos para el tráfico DL. Clase A: Modo por defecto. Los ED transmiten paquetes de forma asíncrona implementando un acceso al medio del tipo ALOHA. Luego de cada transmisión se abren hasta 2 ventanas de recepción para recibir mensajes que provengan del NS. Esta clase está pensada para dispositivos de consumo energético limitado debido a lo cual deben mantener el transmisor/receptor apagado todo el tiempo posible. Clase B: Estos dispositivos están sincronizados con el NS mediante balizas enviadas en modo broadcast a todos los usuarios por los GW clase B. Gracias a este mecanismo, los dispositivos pueden recibir datos DL o comandos en ventanas específicas de tiempo, independientemente del tráfico que envíen. Esta clase está pensada para dispositivos que reciben comandos de control de un controlador remoto. Clase C: Se define para dispositivos sin grandes limitantes en el consumo de energía, que pueden mantener el transmisor/receptor constantemente encendido a la espera de mensajes DL. Esta clase está pensada para dispositivos que operen como actuadores, con estrictos requerimientos de delay. Todos los ED implementan por lo menos las funcionalidades de la clase A y adicionalmente pueden implementar las funcionalidades de clase B o C, manteniendo la compatibilidad con la clase A. La especificación también describe el protocolo de comunicación, que incluye el formato de los paquetes a nivel de capa física y MAC, algunos parámetros de la red, como el SF y las frecuencias a utilizar y los comandos a nivel de capa MAC que se usan para modificarlos.

En cuanto al acceso al medio, la comunicación entre EDs y GW se reparte utilizando distintos canales de frecuencia y SF (recordar que distintos SF son pseudo-ortogonales). El SF y la potencia se regulan de forma cooperativa entre el NS y cada ED mediante el mecanismo de Adaptación de Tasa de Datos (ADR). El acceso al canal se hace de forma aleatoria. De acuerdo a la clase del dispositivo, podrá recibir paquetes, o bien sólo luego de enviarlos, o bien periódicamente, o bien en cualquier momento. Para propagar información sobre los canales disponibles los GW emiten balizas en modo broadcast. Estos además contienen marca de tiempo con fuente GPS. La transmisión de las balizas se hace de forma periódica y sincronizada por todos los GW de la red. Los dispositivos en principio pueden transmitir en cualquier canal disponible, usando cualquier tasa de datos disponible (SF),

siempre que se cumplan las siguientes tres reglas: (1) Antes de transmitir, el ED usa LBT para verificar que el canal está libre. Si el canal no está libre el ED cambia de canal y repite el procedimiento. (2) El ED cambia de canal de forma pseudo-aleatoria para cada transmisión (para hacer más robusta la comunicación). (3) El ED respeta el ciclo de servicio máximo para la sub-banda a utilizar.

De esta forma, los recursos disponibles para la transmisión de datos de los dispositivos son los canales y los SF. Por defecto, el SF se ajusta de acuerdo al nivel de señal en recepción. Para alcanzar lugares en donde la cobertura no es muy buena conviene usar SF altos. Cuando comienza a crecer la cantidad de dispositivos a conectar conviene reducir el alcance de cada GW para poder usar SF bajos, permitiendo conectar más ED. Es así cómo estas redes escalan [8]. A su vez, podrían implementarse otros mecanismos para la asignación de SF de forma más eficiente, optimizando la capacidad de la red como se propone en [9].

NB-IoT

NB-IoT es una de las soluciones estandarizadas por 3GPP para la integración a la red celular del tráfico de IoT de forma masiva. Se puede decir que es, en pocas palabras, una simplificación de LTE adaptada a las necesidades de IoT, particularmente en cuanto a consumo de energía, cobertura y cantidad de dispositivos conectados. La nueva interfaz de radio puede definirse usando por lo menos un Bloque de Recursos (RB) de LTE, previa actualización de software y habilitación de funcionalidades asociadas tanto a nivel de acceso como de Núcleo. Aunque también se puede implementar en las bandas de guarda de LTE, o en un bloque de 200 kHz fuera de la banda asignada a LTE, de forma independiente.

Según el estándar [1], el RB definido para NB-IoT para DL se compone de 12 sub-portadoras de 15 kHz, con CP-OFDM, como en el caso de LTE. Para el enlace ascendente (UL) hay 2 posibilidades: para transmisiones multi-tono se definen sub-portadoras de 15 kHz con SC-FDMA, como en LTE. Para transmisiones de 1 tono, se definen sub-portadoras de 15 kHz o de 3,75 kHz. En este último caso los slots duran 2 ms. En todos los casos cada slot contiene 7 símbolos. En la Tabla 1 se muestran los principales canales y señales definidas a nivel de capa física:

Tabla 1: Canales físicos NB-IoT.

NB-PDCCH	Narrowband Physical Downlink Control Channel
NB-PDSCH	Narrowband Physical Downlink Shared Channel
NB-PBCH	Narrowband Physical Broadcast Channel
NB-PSS/NB-SSS	Narrowband Synchronization Signals
NB-PUSCH	Narrowband Physical Uplink Shared Channel
NB-PRACH	Narrowband Physical Random Access Channel

Notar que a diferencia de LTE no hay canales de UL para control, los reconocimientos se envían usando el NB-PUSCH y las solicitudes de asignación de recursos se hacen vía NB-PRACH. Como en LTE, hay 2 señales para establecer la sincronización: NB-PSS y NB-SSS. La información básica del sistema necesaria para que el dispositivo pueda conectarse a la red aparece distribuida en el Bloque de Información Principal (MIB) y los Bloques de Información del Sistema (SIB). Análogamente a LTE el MIB va en el NB-PBCH y contiene información para decodificar los SIB, la cantidad de puertos de antena y particularmente en este caso el modo de despliegue configurado.

Los SIB se transmiten vía NB-PDSCH y llevan información para acceder a la celda. El NB-PDCCH se usa para transportar la Información de Control en DL (DCI), que lleva la información de asignación de los recursos para las transmisiones UL y DL principalmente. Una diferencia con LTE es que este canal se envía previo al NB-PDSCH con un gap entre los 2. El NB-PDSCH transporta los bloques de tráfico útil (Bloques de Transporte) en DL y los SIB. A diferencia de LTE este canal solo soporta QPSK. Los bits del Bloque de Transporte (TB) se codifican usando codificación "Tail-biting convolutional". Se manejan repeticiones en ciclos en los que cada sub-trama se repite por lo menos 4 veces usando distinta codificación de aleatorización en cada repetición. El NB-PUSCH transporta la Información de Control en UL (UCI) con el formato 1 y los TB de cada dispositivo con el formato 2. El formato 1 soporta solo transmisiones de 1 tono ($\pi/2$ -BPSK y $\pi/4$ -QPSK) y llevan 1 bit de información como UCI, que corresponde al reconocimiento por los TBs transmitidos vía NB-PDSCH. Para el formato 2 el procesamiento es similar al del NB-PDSCH salvo que en este caso se usa codificación Turbo. El NB-PRACH usa esquemas de transmisión de 1 tono y subportadoras de 3,75 kHz para la transmisión de los preámbulos (para acceder al medio), que pueden repetirse hasta 128 veces sobre subtramas contiguas.

En NB-IoT se repiten las transmisiones en los distintos canales a efectos de mejorar la cobertura. El esquema de modulación y la cantidad de repeticiones se configuran como parte del procedimiento de adaptación del enlace, para el nivel de cobertura requerido. De esta forma NB-IoT tiene la posibilidad de extender la cobertura que puede brindar, en base a umbrales definidos para el nivel de señal.

En cuanto a los procedimientos de acceso al medio, básicamente se puede decir que heredan de los de LTE. Tanto en LTE Release 8 como en NB-IoT el acceso al medio se solicita mediante la transmisión en UL de un preámbulo, que se conforma y transmite de acuerdo al caso. En NB-IoT el preámbulo se transmite usando sub-portadoras de 3.75 kHz (NB-PRACH), usando el método basado en contención (no se reservan secuencias preámbulo para el UE). Este proceso desencadena una serie de mensajes de control entre el UE y la radio base que termina con el UE conectado a la red (por lo menos a nivel de acceso) y con recursos asignados para transmitir/recibir datos. La asignación de recursos se hace en la radio base, tanto para UL como para DL y tiene en cuenta tanto las condiciones de radio como los requerimientos de tráfico de cada dispositivo.

El recurso mínimo para asignar en DL (NB-PDSCH) consiste en las 12 sub-portadoras por 1 ms, esto es un RB, como en LTE. El recurso mínimo a asignar para una transmisión UL vía NB-PUSCH se denomina Unidad de Recursos (RU). Para transmisiones de 1 solo tono se define como una sub-portadora de 3.75 kHz por 32 ms, o una sub-portadora de 15 kHz por 8 ms. Para transmisiones multi-tono UL vía NB-PUSCH, se definen 3 sub-portadoras por 4 ms, 6 por 2 ms, o 12 por 1 ms. En caso de transmitir ACK/NAK en UL se usa una sub-portadora de 3.75 kHz por 8 ms o de 15 kHz por 2 ms. La información de scheduling va vía DCI de la radio base a los dispositivos y contiene la asignación de recursos para DL y UL, así como la modulación a utilizar y la cantidad de repeticiones. Cuando el dispositivo recibe el NB-PDCCH, saca de la DCI el retardo D entre el final de la transmisión del NB-PDCCH y el inicio del NB-PDSCH o NB-PUSCH. A su vez a cada dispositivo se le asigna un offset adicional distinto (K_0) para evitar el solapamiento, con lo que cada dispositivo sabe que su transmisión comienza $D+K_0$ slots más adelante [10].

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En esta sección se analiza cada una de las tecnologías estudiadas en cuanto a cobertura, cantidad de dispositivos soportados, confiabilidad, retardo y consumo energético, aspectos clave a la hora de evaluar tecnologías orientadas al tráfico de aplicaciones de IoT. En general se busca:

Buena cobertura y posibilidades de incrementarla respecto a los sistemas tradicionales.

Alta densidad de dispositivos conectados (sin necesidad de alta tasa de datos).

Bajo consumo energético, para maximizar la duración de las baterías de los dispositivos.

Posibilidad de manejar transmisiones confiables (baja tasa de error) y/o con bajo retardo para las aplicaciones que sí lo requieran.

Para tener una referencia, la Tabla 2 muestra estos requerimientos particularmente para los casos de uso asociados al tráfico IoT en 5G [11]. mMTC indica massive Machine Type Communications y refiere al tráfico de muchos dispositivos con muy bajo consumo que transmiten pequeños paquetes de forma esporádica. URLLC indica a Ultra Reliable Low Latency Communications y refiere al tráfico de dispositivos con aplicaciones que tengan estrictos requerimientos en cuanto a confiabilidad y retardo, como ser aplicaciones industriales, por ejemplo. La Pérdida Máxima de Acoplamiento (MCL) se usa como medida de cobertura. Indica la máxima pérdida tolerable entre transmisor y receptor, en [12] se detalla cómo se calcula. Notar que en 5G las aplicaciones de bajo retardo y alta confiabilidad se proyectan en un caso de uso aparte, para lo cual se preverá mecanismos de acceso al medio distintos. Sin embargo, como por el momento se usarán las tecnologías disponibles para este tipo de tráfico, interesa saber qué pueden ofrecer en este sentido.

Tabla 2: Requerimientos 5G para tráficos IoT [11].

Característica	mMTC	URLLC
Cobertura	MCL=164 dB	MCL=164 dB
Dispositivos	1000000/km ²	no especificado
Confiabilidad	1%	0.001%
Retardo	10 s máximo	0.5 ms
Consumo	vida útil de 10 a 15 años	no especificado

En los casos de 802.15-4 y LoRa el análisis realizado comprende resultados obtenidos mediante simulaciones realizadas con ns-2 y ns-3 respectivamente. En el caso de NB-IoT, al no contar con una herramienta libre para hacer simulaciones, el análisis se basa en la documentación disponible. En [13] y [7] se puede encontrar referencias y documentación sobre los módulos utilizados para 802.15-4 y LoRa, respectivamente.

802.15-4

Cobertura: Como se mencionó en la Introducción, 802.15-4 es una tecnología para redes de alcance local, con lo que grandes coberturas no fueron un requerimiento de diseño. Este tipo de redes tienen una cobertura del entorno de las decenas de metros [14]. Sin embargo, al presentar la posibilidad de formar redes malla y combinaciones estrella-malla, definiendo una topología acorde, la cobertura puede extenderse para abarcar mayores áreas en las que haya dispositivos con conectividad entre sí, generando redes de múltiples saltos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este tipo de redes suele tener un desempeño

inferior a las de un sólo salto en el resto de los parámetros a analizar, debido en parte al aumento del uso de los recursos ocasionado por los múltiples saltos [15]. Tener en cuenta que la cobertura es un requerimiento fuerte en redes de amplio alcance y de tipo estrella (como es el caso de las LP-WAN) ya que cuanto mayor cobertura menor es el gasto en infraestructura para brindar el servicio.

Capacidad de dispositivos conectados: Así como con la cobertura, la masividad de dispositivos conectados tampoco fue un requerimiento de diseño en 802.15-4. Nuevamente, esta diferencia con el resto de las tecnologías estudiadas se debe a la diferencia en las topologías consideradas. Típicamente las redes 802.15-4 en modo estrella soportan del orden de las decenas de dispositivos conectados a un coordinador, considerando envíos de paquetes en intervalos del orden de segundos. Con la parametrización a nivel de capa MAC por defecto, la confiabilidad se deteriora rápidamente con el aumento en la cantidad de dispositivos, como se puede ver en la Fig. 3, producto de simulaciones con el módulo WPAN de ns-2.

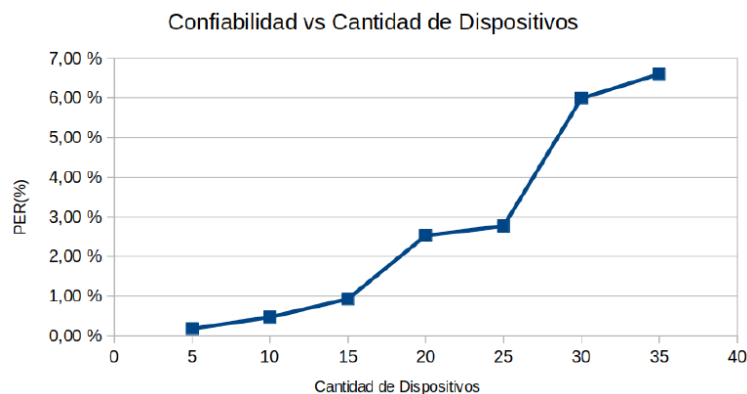


Figura 3: Simulación en ns2 de la tasa de error de paquetes para distintas cantidades de dispositivos conectados.

Al aumentar la cantidad de dispositivos conectados al coordinador, hay mayor competencia por el medio, con lo que es esperable una mayor tasa de error. Para la simulación se usó una topología tipo estrella con cantidad variable de dispositivos emitiendo tráfico de forma periódica hacia un coordinador. Cada dispositivo transmite paquetes de 20 bytes a 250 kbps en intervalos de 1 segundo siguiendo un proceso de distribución de Poisson. La tasa de error reportada es el promedio de las tasas de los dispositivos que transmiten. Las condiciones de cobertura son óptimas tanto en esta simulación como en las que siguen.

Confiabilidad: Como se vio antes, la confiabilidad decae rápidamente con la cantidad de dispositivos conectados a la red, con la parametrización de capa MAC por defecto. Otro factor influyente en la confiabilidad de la red es el perfil de tráfico. La Fig. 4 muestra la tasa de error para 10 dispositivos transmitiendo tráfico de distintas características. Como se puede ver, ante mayor actividad de parte de los dispositivos (menor el período de envío de paquetes), la tasa de error crece, como es de esperarse. Sin embargo, la dependencia no es tan grande con el tamaño de los paquetes enviados.

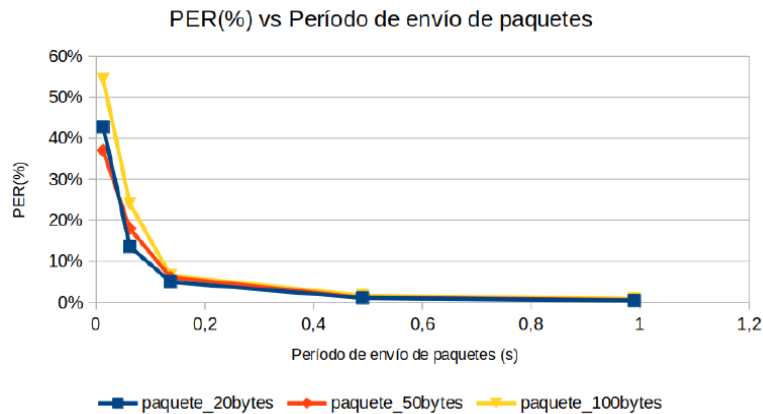


Figura 4: Simulación en ns2 de la tasa de error de paquetes para distintos períodos de envío de paquetes, con 10 dispositivos transmitiendo.

Retardo: Las redes CSMA deterioran su desempeño en cuanto a tasa de errores y a retardo cuando aumenta el número de contendientes y/o aumenta la actividad de la red. Sin embargo, se pueden optimizar los parámetros de acceso al medio como son, la duración, número de veces en que el dispositivo se retira al detectar el canal ocupado y la cantidad máxima de retransmisiones, para lograr un balance entre ambos parámetros [16]. Aumentar los máximos para estos parámetros, puede mejorar la confiabilidad, pero tiene consecuencias tanto en el retardo como en el consumo de los dispositivos. También hay estudios sobre los algoritmos para determinar el tiempo de espera para la transmisión por parte de los dispositivos al detectar el canal ocupado (backoff) [17], con el objetivo de mejorar el desempeño de la red tanto en cuanto a confiabilidad como a retardo. A su vez, 802.15-4 permite configurar en el CFP slots para tráfico dedicado a dispositivos (GTS) que tengan requerimientos más exigentes en este sentido. Hay varios estudios sobre cómo el uso de GTS puede mejorar el desempeño de la red en cuanto a retardo y confiabilidad [18] es uno de ellos.

Consumo: El consumo de los dispositivos depende directamente del nivel de actividad de los mismos. Es por eso que el mecanismo básico para minimizarlo (en cualquiera de estas tecnologías) consiste en tener el dispositivo sin actividad durante la mayor parte de tiempo posible. 802.15-4 implementa (así como otras tecnologías) ciclos de "sueño" para el dispositivo, que en principio pueden regularse con la duración del BI. Cuanto mayor es la diferencia entre este y la duración de la super-trama, mayor tiempo de inactividad tendrá cada dispositivo y por ende menor será su consumo. A su vez, hay varios estudios en donde se proponen otras técnicas para optimizar el ciclo de sueño del dispositivo, tanto centralizadas, como distribuidas [19]. Notar que si bien es deseable reducir el ciclo de actividad del dispositivo, hay que hacerlo con cuidado ya que debe ser suficiente para no sobrecargar el buffer de transmisión, lo cual depende del perfil de tráfico del dispositivo. Una sobrecarga en el buffer de transmisión tiene efectos negativos en el retardo.

LoRa

Cobertura: Las redes LoRa presentan muy buena cobertura y robustez ante interferencia debido a la modulación introducida (CCS) [8]. Esto se debe a la codificación de los bits y dispersión en frecuencia y tiempo de los símbolos. La aplicación de SF altos en zonas más alejadas del GW hace que sea posible tener niveles de cobertura poco menores a los requeridos por 5G: 154/152 dB de MCL en UL/DL de acuerdo a [20].

Capacidad de dispositivos conectados: La Fig. 5 muestra los resultados de simulaciones realizadas con el módulo LoRaWAN desarrollado en el marco de la tesis de maestría [7]. Como modelo de tráfico se utilizó el mismo que en la investigación de la referida tesis: Mobile Autonomous Reporting (MAR), definido en [12]. Se muestra en Fig. 5 la tasa de error en función de la cantidad de dispositivos conectados, en condiciones óptimas de cobertura (todos los dispositivos con SF mínimo). De acuerdo a lo observado, un GW LoRa podría soportar hasta 3000 dispositivos conectados con una tasa de error máxima de 1% y cerca de 10000 con una tasa de error inferior al 3%, que es básicamente lo que se menciona en los estudios sobre la tecnología [7].

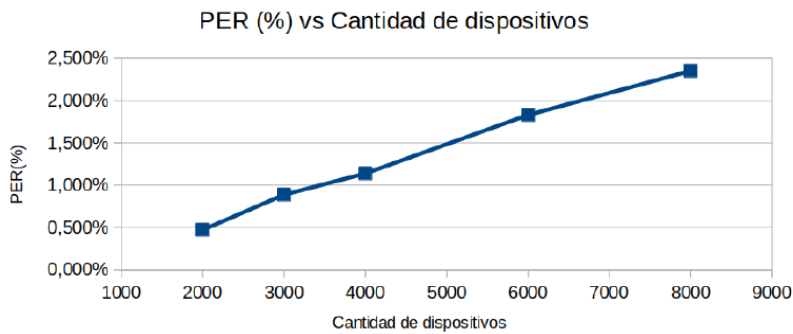


Figura 5: Simulación en ns3 de la tasa de error de paquetes para distintas cantidades de dispositivos conectados.

Confiabilidad: En la Fig. 6 se muestran los resultados de tasa de error en función de la cantidad de dispositivos traficando, para tráfico periódico con distintos períodos. Se puede ver cómo nuevamente el desempeño de la red en principio depende de la cantidad de dispositivos conectados, así como del nivel de actividad de los mismos.

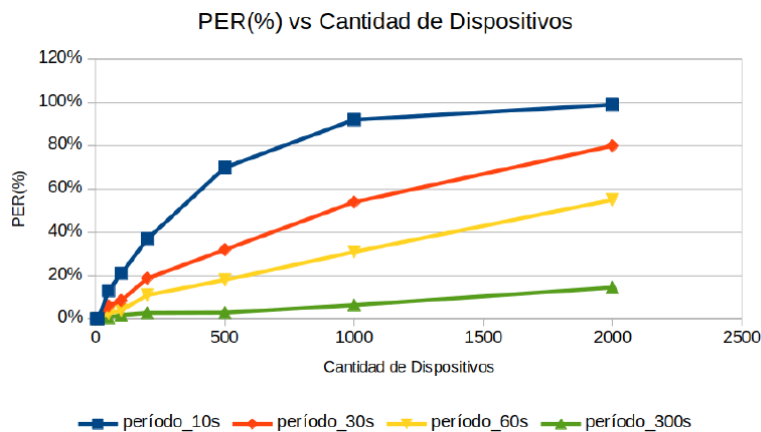


Figura 6: Simulación en ns3 de la tasa de error de paquetes para distintas cantidades de dispositivos conectados, transmitiendo paquetes con distinto período.

Retardo: En la Fig. 7 se muestra el Tiempo en el Aire (ToA) para diferentes tamaños de paquete y SF.

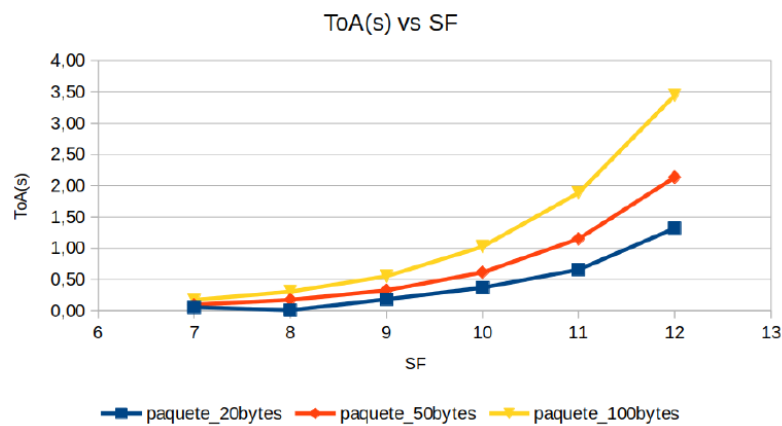


Figura 7: ToA en función del SF y el tamaño de paquete.

Si bien el retardo tiene más componentes aparte del ToA, en una red con buenos niveles de desempeño el valor de ToA da una idea relativamente representativa del mismo y permite estudiar cómo varía con el resto de los parámetros de la red. Con estos resultados se puede visualizar gráficamente lo que se espera de acuerdo a la teoría, el ToA es mayor al asignar mayores SF, con lo que a priori, asignar SF bajos debería implicar mejoras a nivel de retardo, pudiendo llevarlo al entorno de 0.5s.

Consumo: Nuevamente, como en general sucede con las tecnologías orientadas a este tipo de tráfico, LoRa presenta un esquema de acceso al medio pensado para que el ciclo de actividad de los dispositivos que especialmente requieran bajo consumo sea mínimo. El dispositivo básico (clase A) escucha la red sólo en ventanas posteriores al envío de datos UL que también son de tamaño configurable.

NB-IoT

El análisis de NB-IoT se basa en resultados obtenidos de otros trabajos de investigación. Hasta al momento no hay disponible una herramienta de simulación del estilo de las anteriores de uso libre para el estudio. Se está desarrollando un módulo para ns-3, pero el desarrollo actual aún tiene varias limitaciones [21] y [22].

Cobertura: NB-IoT es una de las tecnologías de IoT más relevantes debido a la amplia cobertura que ofrece. En varios de los trabajos sobre el tema se puede ver que cumple con el requerimiento de cobertura para el que fue diseñada, que coincide con el de 5G para el caso de uso mMTC (MCL 164 dB), 20 dB por encima de la cobertura de las redes celulares tradicionales. Esta tecnología emplea varias técnicas para ello. Por un lado, los canales físicos no emplean modulaciones superiores a QPSK, lo que aporta robustez a la comunicación. Por otra parte, se introduce el uso de sub-portadoras de banda menor a los 15 kHz de LTE (3.75 kHz) en canales UL. Esto hace que los símbolos tengan mayor duración en tiempo, lo que mejora la comunicación en lugares con menor señal.

Además, NB-IoT emplea un mecanismo de repeticiones tanto en los canales de datos como en los de control, para mejorar aún más la cobertura, ofreciendo 2 niveles de mejora a la cobertura de la red LTE, dependiendo de la condición del dispositivo. Si bien los resultados en cuanto a cobertura con estos mecanismos son muy buenos, el precio no es menor. Las bajas modulaciones, la subportadora más estrecha y las repeticiones reducen la tasa de datos y por ende aumentan el retardo en la comunicación. NB-IoT está pensada para dispositivos

que transmiten bajos volúmenes de datos, por lo cual en principio no es un problema, pero no es una tecnología adecuada para aplicaciones que requieran más que 250 kbps [23].

Capacidad de dispositivos conectados: NB-IoT es una tecnología conformada para soportar una gran cantidad de dispositivos conectados a la red. Para ello, se implementa una asignación de recursos totalmente dirigido por la red, que permite asignar recursos conociendo varios factores de la misma (más allá de la necesidad de cada dispositivo) con el objetivo de optimizar los recursos, como en LTE. Por otra parte, teniendo en cuenta los bajos requerimientos de tasa de datos del tráfico objetivo, presenta una mayor granularidad en la asignación de recursos para UL, que es el sentido en el que se da la mayor parte de la carga para este tipo de redes. De esta forma es posible asignar recursos (mínimos) a más dispositivos a la vez. También introduce mejoras varias en cuanto al manejo de la señalización para el establecimiento de conexión con el core, a los efectos de lograr mayor eficiencia. De acuerdo a [23], el objetivo de 50000 dispositivos conectados por celda es alcanzable según los estudios realizados hasta el momento. Sin embargo, en la práctica aparecen otros factores (las implementaciones en los distintos modelos de dispositivos, por ejemplo), que pueden dar lugar a variaciones. Al ser un estándar liberado hace poco tiempo, si bien ya hay redes encaminadas a integrar el nuevo servicio, no son muchas aún.

Confiabilidad: Al ser una optimización de LTE, NB-IoT fue diseñada para tener alto grado de confiabilidad en el servicio, así como LTE. Al ser la red quien asigna los recursos, las colisiones pueden darse simplemente a la hora de seleccionar un preámbulo para acceder al medio, con lo que la probabilidad de colisión en el acceso al medio es básicamente la probabilidad de que 2 dispositivos seleccionen el mismo preámbulo a la vez. Una vez que el dispositivo logró conectarse, transmitirá en los recursos asignados por la radio base.

Retardo: Como se mencionó antes, esta tecnología básicamente sacrifica desempeño en cuanto a retardo y tasa de datos, para lograr cobertura. En [23] se puede ver cómo aumenta el retardo al introducir los distintos niveles de repetición en los datos, llegando hasta un máximo de casi 10 s. Con lo que aplicaciones con requerimientos exigentes en este sentido no deberían apuntar a esta solución. Notar que para 5G las aplicaciones que requieren muy bajo retardo se están pensando como un caso de uso aparte (URLLC) y se prevé que tengan mecanismos de acceso diferentes.

Consumo: NB-IoT, como el resto de las tecnologías pensadas para aplicaciones de IoT, implementa varios mecanismos para reducir el ciclo de actividad de los dispositivos en la medida de lo posible. Particularmente, en este caso se introducen 2 mejoras en cuanto a optimización de consumo energético respecto a LTE: Modo Ahorro de Potencia (PSM) y Recepción Discontinua Mejorada (eDRX) [23]. La primera consiste en hacer que el dispositivo deje de ser alcanzable por la red durante períodos más largos, aunque esté registrado. La segunda consiste en extender los ciclos de DRX para el dispositivo. Los ciclos DRX determinan básicamente cada cuánto tiempo el dispositivo "despierta" y escucha la red. La diferencia entre ambos métodos es que el primero genera intervalos de tiempo mayores en los que el dispositivo no es alcanzable por la red. Con esto en teoría deberían alcanzarse los 10 años de vida útil en dispositivos equipados con baterías de 5 Wh que transmiten datos una vez por día. Sin embargo, distintas aplicaciones pueden tener distintos niveles de actividad, por lo que los estudios para ver cómo mejorar el rendimiento

energético en estas redes continúan. Hay que tener en cuenta que optimizar el consumo puede tener consecuencias sobre otros parámetros de desempeño como ser retardo y la accesibilidad. Extender los ciclos de inactividad puede generar consecuencias en el retardo. Por otra parte, como en general los métodos de acceso al medio tienden a aumentar la potencia de transmisión luego de fallar al intentar acceder, algoritmos que pretendan minimizar el consumo en esta etapa, pueden afectar de forma negativa la accesibilidad.

ANÁLISIS COMPARATIVO

En este trabajo se describieron y analizaron brevemente tres tecnologías distintas diseñadas para el tráfico de dispositivos conectados a la red, que es básicamente lo que tienen las tres en común. Ninguna de las tres fue diseñada para tráfico de teléfonos inteligentes, ni pretende soportar altas tasas de datos por dispositivo. Todas presentan mecanismos para reducir al máximo el consumo de los dispositivos a los que conectan y todas siguen un camino similar para lograrlo: extender en la medida de lo posible los ciclos de "sueño" de los dispositivos ya que en ese estado el dispositivo no transmite, ni censa la red y por ende consume menos batería. Cada tecnología lo implementa de distinta forma, pero en todos los casos existe el mismo compromiso: extender los ciclos de sueño demasiado puede impactar en otros indicadores, con lo cual es algo que debe ser regulable de acuerdo a las necesidades del dispositivo. Un dispositivo que necesita transmitir y recibir datos casi todo el tiempo no debería tener grandes ciclos de sueño.

Por otra parte, en cuanto a cobertura, 802.15-4 provee mucho menos alcance que el resto, decenas de metros contra kilómetros. Esto es porque 802.15-4 es una tecnología diseñada para tener un alcance local y ser desplegada bajo otras topologías. Las otras tecnologías fueron pensadas para ser desplegadas bajo una topología de estrella y fueron diseñadas para tener máxima cobertura. En ese sentido ambas aportan una cobertura comparable, aunque de acuerdo a los estudios disponibles, la cobertura de NB-IoT debería ser poco mayor. Ambas tecnologías sacrifican rendimiento en bits transmitidos por segundo para alcanzar amplios niveles de cobertura. LoRa codifica los símbolos con SF altos y NB-IoT repite los datos a transmitir. En teoría, de acuerdo a los estudios realizados, LoRa manejaría velocidades poco inferiores a las de NB-IoT, pero del mismo rango. Sin embargo, para hacer una comparación más precisa habría que considerar dispositivos bajo la misma cobertura, transmitiendo datos con el mismo perfil de tráfico, en principio.

En cuanto a capacidad de dispositivos conectados, nuevamente 802.15-4 provee menos que el resto, básicamente por la misma razón que antes, fue diseñada para desplegarse bajo otra topología. El resto, de acuerdo a las simulaciones realizadas tanto en este estudio como en otros pueden lograr en el entorno de las decenas de miles de dispositivos conectados (por GW o celda). Se dice que NB-IoT presenta mayor eficiencia espectral que LoRa [23], con lo que en la práctica es razonable esperar mayor rendimiento en la primera. Nuevamente, en ambos casos la capacidad dependerá de la cobertura ofrecida a los dispositivos, así como del nivel de actividad en los mismos y de los requerimientos de desempeño del tráfico generado.

En cuanto a confiabilidad, las tres tecnologías son capaces de brindar servicio con niveles de confiabilidad aceptables (entorno de 1%), sin embargo, por una cuestión de diseño, NB-IoT puede otorgar un grado de confiabilidad mayor que el resto [23], dados los mecanismos de acceso, asignación de recursos y transmisión que ofrece. Hay que tener en cuenta que la confiabilidad requerida siempre va a ser un factor limitante en la capacidad de la red, como

pudo observarse en las simulaciones realizadas al querer aumentar la cantidad de dispositivos o el nivel de actividad de los mismos.

En cuanto a Retardo, si bien todas las tecnologías presentan mecanismos para ofrecer comunicaciones con requerimientos de retardo, ninguna puede ofrecer retardos del orden de lo requerido para las URLLC de 5G. En general, reducir el retardo puede tener consecuencias en el resto de los parámetros de la red, como confiabilidad, en el caso de 802.15-4 y cobertura, en el resto y particularmente en el consumo de los dispositivos, aspecto crítico en cualquiera de estas tecnologías. Pero como el bajo retardo es un requerimiento crítico sólo en algunas de las aplicaciones de IoT, resulta interesante la estrategia de estudiarlo como caso de uso aparte, como está ocurriendo con 5G.

El cuadro de la Fig. 8 resume gráficamente las observaciones realizadas. En este “(++)” indica buen desempeño mientras que “(+/-)” indica desempeño medio y “(00)” indica no comparable.

	Cobertura	Capacidad	Confiabilidad	Retardo	Consumo
802.15-4	Decenas de metros (00)	Decenas de dispositivos/coordinador (00)	Depende de la cantidad de dispositivos y el nivel de actividad (+/-)	Usando GTS puede ser del orden del segundo (+/-)	Entre 2 y 10 años de batería (++)
LoRa	Kilómetros (MCL: UL=154 y DL=152dB) (++)	Del entorno de 10k/gateway (+/-)	Depende de la cantidad de dispositivos y el nivel de actividad (+/-)	Usando SF bajos se puede bajar ToA al orden del segundo (+/-)	10 años de batería (++)
NB-IoT	Kilómetros (MCL=164dB) (++)	50k/celda (++)	Diseñada para tener alta confiabilidad (++)	Del orden de segundos, 10 s max (+/-)	10 años de batería (++)

Figura 8: Cuadro comparativo para las tecnologías analizadas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron y analizaron tres tecnologías distintas diseñadas para el tráfico de IoT: IEEE 802.15-4, LoRa y NB-IoT. Se consideraron cinco características clave a la hora de evaluar el desempeño para este tipo de aplicaciones: cobertura, capacidad de dispositivos conectados, confiabilidad, retardo y consumo. Se mostraron capacidades y compromisos entre las características evaluadas para cada caso y finalmente se compararon las tecnologías a los efectos de tener una visión de aplicabilidad en cada caso. Para aplicaciones que requieran sobre todo alta confiabilidad y buena cobertura sin requerimientos fuertes de tasa de datos y retardo, NB-IoT parece ser la mejor opción. Sin embargo, NB-IoT es una opción viable sólo para un operador que ya tiene desplegada infraestructura LTE. LoRa en cambio permite atender los mismos casos de uso sobre espectro no licenciado con infraestructura dedicada, pero con las limitaciones relacionadas al uso del espectro (a nivel de regulación) y un desempeño un poco por debajo de lo que puede ofrecer NB-IoT. 802.15-4 es una opción a considerar, pero bajo una topología distinta, en la que con cobertura inalámbrica local pueda ofrecerse el servicio que se quiere brindar.

REFERENCIAS

1. 3rd Generation Partnership Project. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Overall description, Stage 2 (Release 14)*. 3GPP TS 36.300. 3GPP support office. Valbonne, France. 2017.
2. IEEE Standards Association. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Std 802.11™. New York, USA. 2016.
3. IEEE Standards Association. *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Std 802.16™. New York, USA. 2017.
4. ITU. *ITU towards "IMT for 2020 and beyond"*. Disponible en web: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>.
5. IEEE Standards Association. *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. IEEE 802.15.4™. New York, USA. 2015.
6. SORNIN, N; LUIS, M.; EIRICH, T; KRAMP, T; HERSENT, O. *LoRaWAN™ Specification*. LoRa Alliance. 2015.
7. MAGRIN Davide. "Network level performances of a LoRa system". Directores: Lorenzo Vangelista; Marco Centenaro. Tesis de Maestría, Università degli Studi di Padova, Italia.
8. LoRa® Alliance, Technical Marketing Workgroup. "LoRaWAN™ What is it?: A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™". LoRa® Alliance. San Ramon, USA. November 2015
9. CUOMO, Francesca; CAMPO, Manuel; CAPONIY, Alberto; BIANCHI, Giuseppe; ROSSINIZ, Giampaolo; PISANI, Patrizio. "EXPLoRa: EXtending the Performance of LoRa by suitable spreading factor allocations". En 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob).
10. BOISGUENE, Rubbens; TSENGY, Sheng-Chia; HUANG, Chih-Wei; LIN, Phone. "A Survey on NB-IoT Downlink Scheduling: Issues and Potential Solutions". En 2017 IEEE 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC).

11. 3rd Generation Partnership Project. *Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 14)*. 3GPP TR 38.913. 3GPP support office. Valbonne. France. 2016.
12. 3rd Generation Partnership Project. *Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT) (Release 13)*. 3GPP TR 45.820. 3GPP support office. Valbonne. France. 2015.
13. ZHENG, Jianliang; LEE, Myung J. "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4". *Sensor Network Operations*, IEEE Press, Wiley Interscience, 2006, Chapter 4, pp. 218-237. ISBN 0-471-71976-5.
14. ADAMS, Jon T. "An Introduction to IEEE STD 802.15.4". En 2006 IEEE Aerospace Conference.
15. SAI KIRAN, M. P. R; PRASAD y. R. V; SUBRAHMANYAM, V; RAJALAKSHMI, P. "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 MAC Layer: Prospect for Multi-hop Networks". En 2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS).
16. BRIENZA, Simone; DE GUGLIELMO, Domenico; ANASTASI, Giuseppe; CONTI, Marco; NERI, Vincenzo. "Strategies for Optimal MAC Parameter Setting in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks: a Performance Comparison". En 2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC).
17. RAHAMAN, Md. Mohibur; CHOWDHURY, Mohammad Sanauallah; RAHMAN, Mohammad Osiur; ASHRAFUZZAMAN, Kazi. "Performance Measurement of Different Backoff Algorithms in IEEE 802.15.4". En 2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET).
18. HONGUNTIKAR, Vidya; BIRADAR, Gangadhar S. "Performance Analysis of GTS Allocation in IEEE 802.15.4 with CSMA/CA for Wireless Sensor Network". En 2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems.
19. AL KIYUMI, Raja; VURAL, Serdar; FOH, Chuan Heng; TAFAZOLLI, Rahim. "A Distributed Sleep Mechanism for Energy-Efficiency in Non-Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 Networks". En 2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD).
20. VEJLGAARD, Benny; LAURIDSEN, Mads; NGUYEN, Huan; KOVÁCS, István Z; MOGENSEN, Preben; SORENSEN, Mads. "Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT". En 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring).
21. FONI, Samuele; PECORELLA, Tommaso; FANTACCI, Romano; CARLINI, Camillo; OBINO, Pietro; DI BENEDETTO, Maria-Gabriella. "Evaluation methodologies for the NB-IOT system: issues and ongoing efforts". En 2017 AEIT International Annual Conference.
22. NSNAM. *NB-IoT*. Disponible en web: <https://www.nsnam.org/wiki/NB-IOT>.
23. CHEN, Min; MIAO yiming; HAO yixue; HWANG, Kai. "Narrow Band Internet of Things". IEEE Access special section on key technologies for smart factory of industry 4.0, 2017, vol 5, pp. 20557 – 20577.

SOBRE LOS AUTORES

Gabriela Pereyra obtuvo el título de Ingeniera Electricista (opción Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay en el año 2010. A nivel profesional cuenta con amplia experiencia en planificación y diseño de redes de Inalámbricas debido a su actividad profesional durante los últimos 10 años. Actualmente es estudiante de Maestría en el área de Ing. Eléctrica en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay). Su tema de tesis es: asignación de recursos de radio para los distintos casos de uso de 5G. Sus intereses a nivel de investigación se centran en el estudio de redes inalámbricas particularmente en cuanto a optimización del uso de recursos de radio.

Claudina Rattaro es Ingeniera Electricista perfil Telecomunicaciones, graduándose en julio de 2008. Comenzó a desempeñarse como Ayudante (grado 1) del IIE en abril de 2009. En 2012 obtuvo su título de Magister en Ingeniería Eléctrica (otorgado por FING, UdelaR) con la tesis titulada “Mediciones y Aprendizaje Estadístico aplicado a problemas en Redes Inalámbricas” dirigida por el Dr. Pablo Belzarena. A fines de 2013 comenzó sus estudios de doctorado en el área de Redes Radio Cognitivas, tesis dirigida por el Dr. Pablo Belzarena y la Dra. Paola Bermolen. Ese mismo año comenzó a dedicarse fundamentalmente a la actividad académica. En diciembre de 2017 finalizó sus estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica con la tesis titulada “Stochastic models for Cognitive Radio Networks”. En 2014 obtuvo el cargo de Asistente (grado 2) y desde agosto de 2018 se desempeña como Profesora Adjunta del Depto. de Telecomunicaciones del IIE, FING, UdelaR en Régimen de Dedicación Total. Hasta el 2013 inclusive, ocupó cargos en empresas privadas y públicas (así como también en instituciones gubernamentales) desarrollando su actividad profesional en distintas ramas de la Ingeniería Eléctrica. En particular adquirió experiencia en: automatismo, redes de datos (fundamentalmente en redes inalámbricas), VoIP, desarrollo de software y bases de datos.

Benigno Rodríguez obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico y el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica (opción Telecomunicaciones) de la Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, en 1997 y 2004 respectivamente. En 2007 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Telecomunicaciones, de la Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburgo, Alemania. Desde 1993 a 1999 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (FING), UdelaR. Desde 1998 a 2004 se desempeñó como Asistente de Investigación en el Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), FING, UdelaR. Desde 1997 a 2004 ocupó el cargo de Jefe del departamento de Ingeniería en Carisul S.A. (NEC de Uruguay). Desde 2008 a 2016 fue Profesor Adjunto del Depto. de Telecomunicaciones del IIE, FING, UdelaR. Desde 2008 a 2014 se desempeñó también como Responsable de la Planificación de Red en la empresa Dedicado S.A., Montevideo, Uruguay. Desde junio de 2014 a junio de 2015 ocupó el cargo de Coordinador de Carrera en el área de Mecatrónica en la Universidad Tecnológica del Uruguay, creando la carrera de Tecnólogo en Mecatrónica, como un título intermedio de una Ingeniería en Mecatrónica. Actualmente ocupa el cargo de Profesor Agregado, en Régimen de Dedicación Total en el IIE, FING, UdelaR. Sus principales intereses como investigador se centran en las áreas de: sistemas inalámbricos basados en OFDM, Láseres en Espacio Libre, Ondas Milimétricas y Redes de Sensores Inalámbricos.