

# Tecnologías para la Comunicación de Datos en IoT

## Technologies for Data Communication in IoT

### Guillermo Reggiani

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Bahía Blanca

ghreggiani@frbb.utn.edu.ar

### Sergio Pellegrino

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Bahía Blanca

spellegrino@frbb.utn.edu.ar

### Resumen

Internet de las cosas (IoT) se ha convertido en una parte integral de la vida cotidiana y de diversas industrias. Se espera que la cantidad de dispositivos conectados siga creciendo de manera exponencial durante los próximos años.

Para soportar una conectividad masiva se hace uso de diversas tecnologías inalámbricas. En tal sentido, en este trabajo se propone describir las tecnologías de conectividad IoT inalámbrica existentes, como también las soluciones emergentes que se puedan usar de manera efectiva para permitir la conectividad de dispositivos IoT.

Para clasificar las tecnologías de conectividad aplicables a IoT, los principales parámetros a considerar son: el rango de cobertura, la tasa de transferencia, la latencia, el consumo de energía y la confiabilidad. Otra cuestión importante a considerar son los requisitos de servicio impuestos por el campo de aplicación. En tal sentido, la importancia relativa de los parámetros mencionados previamente debe ser analizada en función del contexto determinado por la aplicación y el entorno de operación. Dentro de las soluciones emergentes para IoT, vamos a trabajar con el nuevo estándar IEEE 802.11ah conocido como Wi-Fi HaLow.

Palabras clave: IoT, Tecnologías Inalámbricas, 802.11ah

### Abstract

The Internet of Things (IoT) has become an integral part of everyday life and various industries. The number of connected devices is expected to continue to grow exponentially over the next few years.

Various wireless technologies are used to support massive connectivity. In this sense, this work proposes to describe the existing wireless IoT connectivity technologies, as well as the emerging solutions that can be effectively used to enable the connectivity of IoT devices.

To classify the connectivity technologies applicable to IoT, the main parameters to consider are: coverage range, transfer rate, latency, energy consumption and reliability. Another important issue to consider is the service requirements imposed by the field of application. In this sense, the relative importance of the previously mentioned parameters must be analyzed based on the context determined by the application and the operating environment. Within the emerging solutions for IoT, we are going to work with the new IEEE 802.11ah standard known as Wi-Fi HaLow.

Keywords: IoT, Wireless Technologies, 802.11ah

## Introducción

Dado que se espera tener miles de millones de dispositivos de diferentes tipos conectados en aplicaciones de IoT, se hace necesario disponer de diversas tecnologías para facilitar su conectividad. Las tecnologías inalámbricas para la conectividad IoT se pueden clasificar de acuerdo a su rango de cobertura en: tecnologías de corto y de largo alcance.

Dentro de las tecnologías de corto alcance cabe mencionar a Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, 6LoWPAN y las tecnologías ópticas emergentes (OWC). Dentro de las tecnologías de largo alcance se incluyen LTE (4G) y 5G; dentro de las LPWAN (Low Power Wide Area Network) sin licencia, LoRa; y dentro de las LPWAN con licencia NB-IoT (Narrow Band IoT). Esta enumeración no excluye otras tecnologías, actuales y emergentes, que también pueden ser de interés y utilidad.

Un nuevo estándar inalámbrico, IEEE 802.11ah (IEEE Std 802.11ah-2017), también conocido como Wi-Fi HaLow, introduce un equilibrio entre el rendimiento y el alcance, siendo especialmente destinado a su utilización en IoT. IEEE 802.11ah opera en bandas de frecuencia sub-GHz sin licencia (863-868 MHz en Europa, 755-87 MHz en China y 902-928 MHz en América del Norte) y puede proporcionar conectividad hasta un máximo de 8192 dispositivos de bajo consumo a velocidades mínimas de 150 kbps a un valor máximo típico de 78 Mbps con una cobertura de hasta 1 km.

De acuerdo a una visión amplia de las tecnologías de conectividad para IoT inalámbrica existentes, se discuten varias soluciones emergentes que se pueden usar de manera efectiva para permitir la conectividad basadas en el rango de cobertura (Ding et al., 2020: 67646-67673).

También se señalan los desafíos técnicos clave de las tecnologías de conectividad existentes para su aplicación en IoT. Se abordan algunos ejemplos de proyectos prometedores, tales como el acceso aleatorio de detección compresiva (CS), el acceso múltiple no ortogonal (NOMA), y acceso aleatorio masivo de entrada múltiple salida múltiple (mMIMO) que podría emplearse en estándares futuros para soportar la conectividad en IoT. Finalmente se realiza una clasificación de las aplicaciones IoT en términos de varios requisitos de servicio, tales como:

- Tasa de datos: las aplicaciones IoT pueden tener diferentes tasas de transmisión: desde decenas de kbps hasta decenas de Gbps (Chen et al., 2017: 20557-20577). Las aplicaciones IoT de alta tasa de datos por lo general trabajan con streaming de video, multimedia y aplicaciones web; requieren tasas de datos mayores a 10 Mbps y típicamente están soportadas por 4G, 5G, OWC y Wi-Fi incluyendo 802.11ah. Las aplicaciones IoT de rango medio en cuanto a la tasa de datos, por lo general son aplicaciones para hogares inteligentes, soportadas mediante tecnologías ZigBee, Bluetooth/BLE o LTE-M. Aplicaciones IoT de baja tasa de datos típicas son, entre otras: monitoreo de sensores, rastreo de bienes, estacionamiento inteligente, agricultura inteligente. Por lo general se basan en NB-IoT, LoRa, Sigfox (Adelantado et al., 2017: 34-40) y Wi-Fi HaLow. Y una cuestión muy importante para este rango de aplicaciones es el consumo, ya que muchas veces están alojadas en dispositivos alimentados con baterías.
- Latencia: la mayoría de las aplicaciones IoT son sensibles a la latencia, pero el grado de sensibilidad varía de acuerdo al tipo de aplicación. Las aplicaciones se pueden clasificar como sensibles al retardo, si son altamente sensibles, o como tolerantes al retardo, si tienen baja sensibilidad (Yi et al., 2020: 29-43). Entre las primeras se pueden mencionar como ejemplos a los vehículos autónomos, cuya velocidad máxima y distancia a otros vehículos se deben fijar de acuerdo a la latencia, y los sistemas de monitoreo remoto de parámetros vitales de un paciente. Entre los sistemas tolerantes a la latencia se pueden mencionar a los sistemas para monitoreo en agricultura, sistemas de estacionamiento inteligente, sistemas de gestión de residuos, etc. En este tópico se abren posibilidades de analizar las posibilidades que brindan las redes disponibles en una región determinada, a fin de evaluar su factibilidad de uso y limitaciones para aplicaciones críticas en cuanto a la latencia.
- Alcance: el alcance de las aplicaciones IoT puede variar desde unos pocos metros hasta muchos kilómetros. Para corto alcance, las tecnologías típicas son Bluetooth/BLE, OWC, Wi-Fi y ZigBee, aunque cabe explorar otras opciones, como se analiza en (Friedrich y Reggiani, 2022).
- Potencia: la eficiencia energética es un importante requerimiento para muchas aplicaciones IoT. Mientras que algunos dispositivos pueden estar conectados a la red eléctrica o tener facilidades para recargar sus baterías, otras en cambio deben maximizar la duración de sus baterías, incluso por varios años (Froytlog et al., 2019: 111-117), (Qin et al., 2019: 140-145).

- Confiabilidad: De acuerdo a los requerimientos de confiabilidad en las comunicaciones, las aplicaciones IoT pueden clasificarse en: aplicaciones de misión crítica y no críticas. Ejemplos de las primeras son: las redes eléctricas inteligentes (smart grids), los robots de manufactura, vehículos autónomos y dispositivos móviles para monitores de parámetros vitales (mobile health-care) (Mohammed et al., 2019: 127198-127216).
- Movilidad: las aplicaciones IoT también pueden clasificarse de acuerdo a su grado de movilidad, en aplicaciones de baja y alta movilidad. En el caso de las de baja movilidad, pueden apoyarse en cualquiera de las tecnologías de conectividad existentes. Los desafíos se presentan para las aplicaciones de alta movilidad. En estos casos, por lo general se apoyan en las tecnologías basadas en las redes de celulares (4G y 5G), que requieren de mejoras para soportar las exigencias de las aplicaciones de alta movilidad (Wu y Fan, 2016: 450-476).

Una de las tecnologías emergentes para la comunicación de datos en IoT es VCL (Visible Light Communication) (Kadam y Dhage, 2016: 275-278), que intenta superar la saturación del espectro que sufren las redes locales inalámbricas por radiofrecuencia. Esta tecnología es apta para la comunicación de dispositivos IoT en interiores, mediante un enlace ascendente confiable y un enlace descendente de gran ancho de banda.

Otro actor fundamental en la comunicación de datos en IoT son los protocolos de comunicación. Éstos deben ofrecer una comunicación ágil, segura y confiable, sin comprometer las limitaciones computacionales y de consumo de energía de los dispositivos (Sharma y Gondhi, 2018: 1-6). Varios protocolos que se utilizan en la actualidad son: CoAP, MQTT, XMPP, RESTFUL, 6LOWPAN y RPL. Estos protocolos determinan la eficacia y confiabilidad de la comunicación, e influyen sobre la eficiencia energética y la seguridad de las aplicaciones.

Un ejemplo del tipo de aplicaciones IoT que interactúan con las personas en su vida doméstica es el que se describe en (Di Zenobio et al., 2017: 1-6): una plataforma integrada de dispositivos IoT para el manejo con eficiencia energética de la iluminación de los espacios comunes de un edificio. Estos dispositivos se pueden interconectar en forma inalámbrica o mediante Power Line Communication. Una alternativa interesante a explorar para la conectividad de un sistema de este tipo es la presentada en (Friedrich y Reggiani, 2022).

Otro ejemplo es en el sector agrícola. En (Singh et al., 2020: 885-887) se explora un despliegue piloto de IoT basado en LoRa en un invernadero. Este estudio piloto ayuda a identificar desafíos y limitaciones de la conectividad IoT para este contexto. También se analizan posibles perspectivas de investigación para aumentar las oportunidades de ahorro de energía y de eficiencia en la comunicación inalámbrica de datos.

Otro punto clave es el de los estándares en lo atinente a redes y comunicaciones, que impactan sobre el desempeño de los sistemas IoT. Algunas funciones de las tecnologías de Internet convencionales, como los protocolos de acceso y los mecanismos de control de tráfico, deben adecuarse para IoT. En (Yokotani, 2017: 1-4) se analiza la arquitectura de la red, incluidas las redes de área amplia y las redes de área personal o de proximidad, para IoT. Además, se especifican los requisitos de estas redes y se proponen tecnologías que pueden cumplir con los mismos.

## Grado de Avance

Se ha venido trabajando en la temática de redes, especialmente inalámbricas, con orientación a su aplicación en sistemas embebidos para entornos con restricciones temporales. También se cuenta con experiencia en el diseño y desarrollo de hardware y software de sistemas embebidos, incluyendo aplicaciones al procesamiento digital de señales.

En el marco del último PID, se ha estado trabajando sobre aplicaciones de IoT para la conservación de la energía, y se han realizado experiencias con la conexión de dispositivos IoT mediante RS485 sobre la red eléctrica, sin necesidad de redes inalámbricas ni otro cableado adicional. Si bien es un tema que se seguirá explorado dentro del nuevo PID, nos abocaremos a las tecnologías de redes inalámbricas donde ya hemos realizado trabajos en las siguientes áreas:

- Estudio y análisis de redes inalámbricas de área personal (WPAN), específicamente en el estándar IEEE 802.15.3.
- Se han desarrollado diversas metodologías con el objetivo de mejorar el rendimiento de las redes WPAN, evaluación de su desempeño bajo distintos esquemas de diagramación en tiempo real.

- Estudio y análisis de redes inalámbricas de área local (WLAN). Se han presentado y evaluado propuestas de variantes al mecanismo de control de acceso al medio de 802.11 y 802.11e, a fin de mejorar el desempeño de la red para aplicaciones de tiempo real.

En virtud de lo ya efectuado, actualmente nos encontramos en el estudio y análisis del estándar 802.11ah (también denominado Wi-Fi HaLow) el cual describiremos en el apartado siguiente.

## Descripción del estándar IEEE 802.11ah (HaLow)

En la Fig. 1 se muestra una comparativa de las variantes Wi-Fi existentes en la actualidad, siendo 802.11ah un estándar especialmente diseñado para Internet de las cosas (IoT).

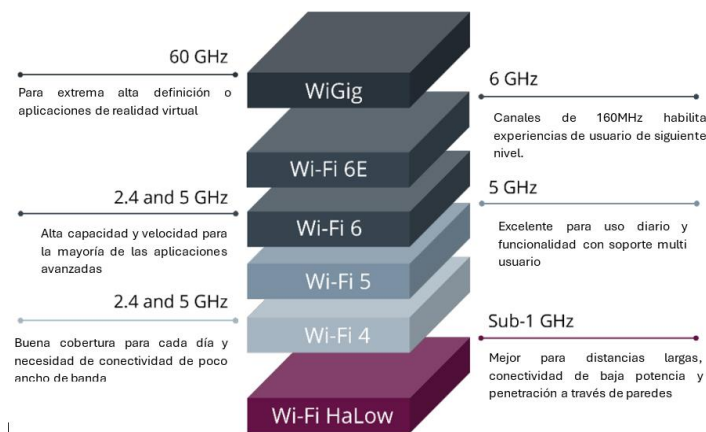


Figura 1. Comparativa de variantes Wi-Fi

IEEE 802.11ah opera en la sub-banda no licenciada de 1GHz y depende de cada país. Las bandas utilizadas van desde 863 MHz a 868 MHz y 902 MHz a 928 MHz, configurable en canales de 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz y 16 MHz.

En Argentina, el ente regulador Enacom habilita el uso de la banda 902 MHz a 928 MHz.

Provee conectividad a un máximo de 8192 dispositivos con un solo AP y hasta 1km de cobertura con un bajo consumo, permitiendo atravesar con mayor facilidad diversos obstáculos como paredes.

Al ser un estándar, no necesita de dispositivos propietarios e integra soporte IP nativo.

Las velocidades que se pueden alcanzar con Wi-Fi HaLow van desde los 150 Kbps a un máximo de 347 Mbps con distintos esquemas de codificación, modulación, ancho de banda e intervalos de guarda para diferentes flujos espaciales (Baños-Gonzalez et al., 2016).

En la Tabla 1, se pueden observar del estándar (IEEE Std 802.11, 2020: 3311) algunas de las combinaciones disponibles para un ancho de banda de 1 MHz y un solo flujo espacial (Number of spatial streams,  $N_{ss}$ ).

En cuanto a la seguridad, permite el uso de Wi-Fi WPA3 y Wi-Fi Enhanced Open security.

En la capa MAC del estándar se incluyeron mejoras para gestionar el bajo consumo, largo alcance y admitir una gran cantidad de dispositivos especialmente en IoT en una sola celda.

Respecto a la trama, se realizaron modificaciones para incrementar el rendimiento introduciendo un formato de trama compacta.

Debido a que en dispositivos IoT la sobrecarga del encabezado respecto al tamaño del dato útil puede ser considerable, esta trama compacta incrementa la eficiencia. En la Fig. 2 (IEEE Std 802.11, 2020: 3197) se observa cómo está definida la trama compacta para transmisiones SU (Simple User) utilizadas en 2, 4, 8 y 16 MHz. En la Tabla 2 se resume el significado de los campos (IEEE Std 802.11, 2020: 3198).

MCS Idx	Mod	R	$N_{BPSCS}$	$N_{SD}$	$N_{SP}$	$N_{CBPS}$	$N_{DBPS}$	$N_{ES}$	Data_rate (kb/s)	
									8 $\mu$ s GI	4 $\mu$ s GI
0	BPSK	1/2	1	24	2	24	12	1	300.0	333.3
1	QPSK	1/2	2	24	2	48	24	1	600.0	666.7
2	QPSK	3/4	2	24	2	48	36	1	900.0	1000.0
3	16-QAM	1/2	4	24	2	96	48	1	1200.0	1333.3
4	16-QAM	3/4	4	24	2	96	72	1	1800.0	2000.0
5	64-QAM	2/3	6	24	2	144	96	1	2400.0	2666.7
6	64-QAM	3/4	6	24	2	144	108	1	2700.0	3000.0
7	64-QAM	5/6	6	24	2	144	120	1	3000.0	3333.3
8	256-QAM	3/4	8	24	2	192	144	1	3600.0	4000.0
9	256-QAM	5/6	8	24	2	192	160	1	4000.0	4444.4
10	BPSK	1/2 with 2 $\times$ repetition	1	24	2	24	6	1	150.0	166.7

Tabla 1. Esquemas de codificación y modulación para un flujo espacial

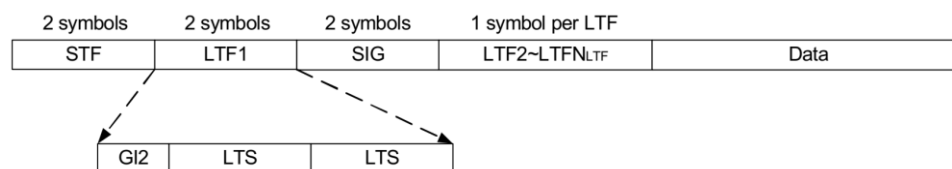


Figura 2. Formato de trama compacta

Campo	Descripción
STF	Short Training field
LTF	Long Training field
SIG	SIGNAL field
Data	The Data field carries the PSDU(s)
GI2	Double guard interval
LTS	Long training symbol

Tabla 2. Campos de la trama IEEE 802.11ah



Para esto se incluyó solamente dos campos de dirección obligatorios en lugar de los cuatro que tiene el encabezado de la trama heredada de otras versiones 802.11. Los campos de Alto Rendimiento (HT) y Calidad de Servicio (QoS) fueron movidos dentro del campo SGI en el encabezado PHY, eliminando el campo Duración/ID. Con estas modificaciones la sobrecarga se reduce de 30 bytes a 18 bytes.

Para la reducción de la sobrecarga de las tramas de control MAC se utilizan Paquetes de Datos Nulos (NDP), que contienen un encabezado PHY sin ningún dato. Las diferentes tramas de control (por ejemplo, CTS, ACK, trama PS-Poll, etc.) se sustituyen por tramas NDP para reducir la sobrecarga del protocolo.

Para aumentar la cantidad de estaciones admitidas, el IEEE 802.11ah utiliza una nueva estructura jerárquica de Identificador de Asociación (AID). El AID asignado por el AP durante la asociación tiene un tamaño de 13 bits, por lo tanto, puede asociar hasta 8191 ( $2^{13}-1$ ) estaciones. La estructura del AID consta de cuatro niveles jerárquicos: página, bloque, subbloque e índice de la estación en el subbloque. Esta estructura es utilizada para agrupar estaciones según características similares (por ejemplo, patrón de tráfico, ubicación, nivel de batería, etc.).

## Conclusiones

Con lo estudiado hasta el momento se pretende continuar con el análisis del estándar 802.11ah en diferentes entornos, que van desde un edificio hasta una ciudad con un índice de interferencia elevado.

Para ello, se deberá contar con equipamiento adecuado como son los Puntos de acceso, estaciones cliente y kits de desarrollo que soporten este estándar. La dificultad actual de adquirir este tipo de equipamiento, debido a su reciente aparición en el mercado de los primeros chips HaLow, no nos impide avanzar con el análisis mediante la utilización de simulaciones.

Por último, aprovechando una característica específica del estándar como es la estructura de supertrama, vemos la posibilidad de realizar modificaciones para su funcionamiento en sistemas de tiempo real.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca por el apoyo en esta temática mediante el aporte económico a través de los Proyectos de Investigación y Desarrollo del cual somos parte del PID CCPPBB0010144.

## Referencias

- Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J. y Watteyne, T. (2017). "Understanding the Limits of LoRaWAN," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, 34-40, Sept. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- Chen M., Miao Y., Hao Y. y K. Hwang. (2017). "Narrow Band Internet of Things," in IEEE Access, vol. 5, 20557-20577, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751586.
- Ding J., Nemati M., Ranaweera C. y Choi J. (2020). "IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey," in IEEE Access, vol. 8, 67646-67673, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932.
- Di Zenobio D., Steenhaut K., Thielemans S. y Celidonio M. (2017). "An IoT platform integrated into an energy efficient DC lighting grid," 2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2017, 1-6, doi: 10.1109/WTS.2017.7943547.
- Friedrich G. y Reggiani G. (2022). "Comunicación de datos para dispositivos IoT de bajos recursos: RS485 sobre la red eléctrica". Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE 2022), Universidad Nacional de la Plata, del 18 al 19 de agosto de 2022.
- Froytlog A., Foss T., Bakker O., Jevne G., Haglund M. A., Li F. Y., Oller J. y Li G. Y. (2019) "Ultra-low power wake-up radio for 5G IoT," IEEE Commun. Mag., vol. 57, no. 3, 111-117, Mar. 2019.

IEEE Standard for Information technology 802.11 - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2020), 3197-3198, 3311.

Kadam K. y Dhage M. R. (2016). "Visible Light Communication for IoT," 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), 2016, 275-278, doi: 10.1109/ICATCCT.2016.7912007.

Mohammed N. A., Mansoor A. M. y Ahmad R. B. (2019). "Mission-critical machine-type communication: An overview and perspectives towards 5G," IEEE Access, vol. 7, 127198-127216, 2019.

Qin Z., Li F. Y., Li G. Y., McCann J. A. y Ni Q. (2019). "Low-power wide-area networks for sustainable IoT," IEEE Wireless Commun., vol. 26, no. 3, 140-145, Jun. 2019.

Sharma C. y Gondhi N. K. (2018). "Communication Protocol Stack for Constrained IoT Systems," 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), 2018, 1-6, doi: 10.1109/IoTSIU.2018.8519904.

Singh R. K., Berkvens R. y Weyn M. (2020). "Energy Efficient Wireless Communication for IoT Enabled Greenhouses," International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS), 2020, 885-887, doi: 10.1109/COMSNETS48256.2020.9027392.

Baños-Gonzalez Victor, Shahwaiz Afaqui M., Lopez-Aguilera Elena, Garcia-Villegas Eduard (2016). Throughput and Range Characterization of IEEE 802.11ah. doi:10.1109/TLA.2017.8015044.

Wu J. y Fan P. (2016). "A survey on high mobility wireless communications: Challenges, opportunities and solutions," IEEE Access, vol. 4, 450-476, 2016.

Yi C., Cai J., y Su Z. (2020). "A multi-user mobile computation offloading and transmission scheduling mechanism for delaysensitive applications," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 19, no. 1, 29-43, Jan. 2020.

Yokotani T. (2017). "Requirements on the IoT communication platform and its standardization," Japan-Africa Conference on Electronics, Communications and Computers (JAC-ECC), 2017, 1-4, doi: 10.1109/JECECC.2017.8305765.