

## Survey de Protocolos Normalizados por IETF/IRTF para Aplicaciones de Internet of Things (IoT)

Gustavo Mercado<sup>1</sup>, Carlos Tafernaberry<sup>1</sup>, Marcela Orbiscay<sup>1,2</sup>,  
Marcelo Ledda<sup>1</sup>, Raúl Moralejo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> gridTICs - Dpto Electrónica - UTN FRM  
Rodríguez 273, Mendoza, Argentina  
{gustavo.mercado}@gridtics.frm.utn.edu.ar

<sup>2</sup> IANIGLA - Centro Científico Tecnológico - CONICET Mendoza  
Av. Ruiz Leal s/n, Mendoza, Argentina  
morbis@mendoza-conicet.gob.ar

**Resumen.** Por lo general, el término Internet de las Cosas se refiere a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos y sensores de reducidas dimensiones y escaso poder de cálculo, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana. En la Internet tradicional, la interoperabilidad es el valor esencial; o sea el primer requisito de una buena conectividad a Internet es que los sistemas “conectados” deben poder “hablar el mismo idioma” en cuanto a protocolos y codificaciones. La interoperabilidad eficaz y bien definida, puede fomentar la innovación y ofrecer eficiencias a quienes fabrican dispositivos, aumentando así el valor económico total del mercado. IoT implica vincular dispositivos, que en muchos casos nunca se han conectado antes, o al menos no en otra cosa que no sea una red cerrada y especializada. En un entorno totalmente interoperable, cualquier dispositivo de la IoT se podría conectar a cualquier otro dispositivo o sistema e intercambiar información si así lo desean. La interoperabilidad, los estándares, los protocolos y las convenciones son temas fundamentales en el desarrollo y la adopción temprano de los dispositivos de la IoT. También implica administrar esos objetos y desarrollar aplicaciones para que hagan cosas juntas que nunca podrían hacer solos. Entonces, los productos de diferentes proveedores eventualmente tendrán que hablar el mismo idioma, en algún nivel. El Internet Engineering Task Force (IETF) es una de las más importantes entidades de estandarización de los protocolos de Internet. Como tal y desde hace unos años, ha venido generando varios protocolos para IoT. En esta comunicación se revisan estos nuevos potocolos como así también los grupos de trabajo donde fueron creados.

Palabrasr Clave: Internet, Protocolos, Internet of Things, Internet de las Cosas, IETF, IRTF, 6lowPAN, 6TiSCH, RPL, Roll, ACE, CoRE, CoAP.

## 1 Introducción

Según [1] *“La Internet de las cosas es un tema emergente de importancia técnica, social y económica. Las proyecciones del impacto de la IoT sobre Internet y la economía son impresionantes: hay quienes anticipan que en el año 2025 habrá hasta cien mil millones de dispositivos conectados a la IoT y que su impacto será de US\$ 11.000.000.000.000.”*

Sin embargo, existen importantes desafíos para un desarrollo armonioso, benéfico y productivo, de la Internet de las Cosas. *“Un entorno fragmentado de implementaciones técnicas propietarias de IoT podría inhibir su valor para los usuarios y la industria”* se dice en [1]. Por lo que una “interoperabilidad” eficaz y bien definida, puede fomentar la innovación y ofrecer eficiencias a quienes fabrican dispositivos, aumentando así el valor económico total del mercado. Por lo que contar con estándares apropiados, modelos de referencia y mejores prácticas, harán una implementación y despliegue de IoT más viable, económicamente hablando y más confiable, desde el punto de vista de usuario. El Protocolo de Internet (IP), de la IETF [2], siempre ha cumplido la función de ser abierto y ampliamente disponible, por lo en este trabajo, nos referiremos al IP para el desarrollo de la IOT.

Los protocolos mencionados en este trabajo son: Protocolo: “6lowPAN”, grupo IETF: “IPv6 over Networks of Resource-constrained Nodes (6lo)”, Protocolo: “6TiSCH”, grupo IETF: “IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e (6tisch)”, Protocolo: “RPL”, grupo IETF: “Routing Over Low power and Lossy networks (roll)”, Protocolo: “ACE”, grupo IETF: “Authentication and Authorization for Constrained Environments (ace)” y Protocolo: “CoAP”, grupo IETF: “Constrained RESTful Environments (CoRE)”. También se hará mención a otras iniciativas para regular IoT, como las investigaciones llevada a cabo por la Internet Research Task Force (IRTF) [3].

## 2. Estándares del IETF referidos a IoT

### 2.1 6lowPAN: IPv6 sobre redes restringidas.

El primer grupo de tareas del IETF referido a IoT, IPv6 sobre WPAN de baja potencia (6LoWPAN) [4], se constituyó en marzo de 2005. Este grupo definió métodos para adaptar IPv6 a redes IEEE 802.15.4 [5] (WPAN) que utilizan tamaños de paquetes muy pequeños mediante la compresión de encabezados [6] y la optimización para el descubrimiento vecino (neighbor discovery). Las características del diseño de IPv6, como una estructura de encabezado simple y su modelo de direccionamiento jerárquico, lo hacen ideal para su uso en redes integradas inalámbricas con una capa intermedia (middleware) como 6LoWPAN. Además, al crear un grupo estándares dedicados, los requisitos mínimos para implementar una pila liviana de IPv6 con 6LoWPAN podrían estar alineados con la mayoría de los dispositivos con características mínimas. Finalmente, al diseñar una versión de Neighbor Discovery (ND) específicamente para 6LoWPAN, se podrían tener en

cuenta las características particulares de las redes de malla inalámbrica de baja potencia. El resultado de 6LoWPAN es la extensión eficiente de IPv6 a una red inalámbrica de dominio embebido, lo que permite crear redes IP de extremo a extremo y con características para una amplia gama de aplicaciones embebidas [7]. En la Fig 1 se muestra la pila de protocolos de 6LoWPAN.

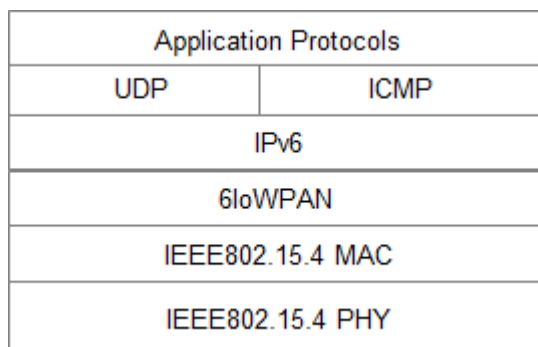


Fig 1: Pila de protocolos en 6LoWPAN

El grupo de trabajo 6LoWPAN concluyó sus tareas en 2014, y el grupo de trabajo 6Lo [8], que lo reemplaza, aplica mecanismos de adaptación similares a una gama más amplia de tecnologías de radio, incluyendo "Bluetooth Low Energy" (RFC 7668) [9], ITU-T G.9959 (RFC 7428) [10], el estándar de teléfono inalámbrico DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) (RFC 8105) [10] y la tecnología de red por cable de bajo costo Master-Slave/Token-Passing (MS /TP) (RFC 8163) [12]. Últimamente hay varias iniciativas, en el grupo de trabajo 6Lo, referidas a la aplicación de IPv6 en redes restringidas, como es el caso de Near Field Communication [13], PLC Networks [14] y Wireless Body Area Networks [15].

## 2.2 Encaminamiento en IoT

El grupo de trabajo Routing Over Low-Power and Lossy Networks (ROLL) [16] produjo especificaciones para el protocolo RPL "Protocolo de enrutamiento IPv6 para redes de baja potencia y con pérdidas" (RFC 6550) [17] y un conjunto de extensiones relacionadas para diversas métricas de enrutamiento, funciones objetivo y multicast. Otro resultado de ROLL, fue una serie de documentos de requisitos y declaraciones de aplicabilidad, un documento de terminología y un análisis de amenazas de seguridad.

RPL es un protocolo de enrutamiento de vector de distancia IPv6 para LLN que especifica cómo construir un gráfico acíclico orientado a destino (DODAG Destination Oriented Directed Acyclic Graph) [18] utilizando una función objetivo y un conjunto de métricas / restricciones. La función objetivo opera en una combinación de métricas y restricciones para calcular la 'mejor' ruta.

El gráfico construido por RPL es una topología de enrutamiento lógico construida sobre una red física para cumplir un criterio específico y el administrador de red puede decidir tener múltiples topologías de enrutamiento (gráficos) activas al mismo

tiempo utilizadas para transportar tráfico con diferentes requisitos. Un nodo en la red puede participar y unirse a uno o más gráficos (en este caso los llamamos "instancias de RPL") y marcar el tráfico de acuerdo con la característica del gráfico para admitir el enrutamiento basado en la restricción de QoS.

### 2.3 Capa de Aplicación

El grupo de trabajo de Constrained RESTful Environments (CoRE) [19] sigue siendo uno de los grupos de IoT más activos. Su resultado principal se centra en el "Protocolo de aplicación restringida" (CoAP - Constrained Application Protocol - RFC 7252) [20], análogo a HTTP pero radicalmente simplificado y basado en UDP. Las extensiones para CoAP permiten las comunicaciones de grupo (RFC 7390) [21] y se puede crear servidores de baja complejidad para la observación de recursos (RFC 7641) [22]. Esto se complementa con un mecanismo de descubrimiento y auto-descripción basado en un formato de enlace web adecuado para dispositivos restringidos (RFC 6690) [23]. Las actividades actuales del grupo de trabajo se centran en extensiones que permiten la transferencia de grandes recursos, el uso de directorios de recursos para coordinar descubrimiento, descripciones de interfaz reutilizables y el transporte de CoAP sobre TCP y TLS. El grupo de trabajo CoRE se está reconfigurando para incluir funciones de gestión al estilo de RESTCONF y comunicaciones estilo publicación-suscripción a través de CoAP. En CoRE también se está buscando un formato de datos para representar mediciones de sensores, que se beneficiarán de la "Representación conciso de objetos binarios" (CBOR - Concise Binary Object Representation - RFC 7049) [24], un análogo a JSON (JavaScript Object Notation) [25], optimizado para datos binarios e implementaciones de bajos recursos.

CoAP es un protocolo de transferencia web optimizado para redes con recursos limitados típico de las aplicaciones IoT. CoAP se basa en una arquitectura REST [26] en la que los recursos son abstracciones controladas por el servidor que están disponibles en un proceso de aplicación e identificadas por los identificadores universales de recursos (URI). Los recursos se pueden manipular por medio de los mismos métodos utilizados por HTTP: GET, PUT, POST y DELETE. CoAP no es una compresión ciega de HTTP. Consiste en un subconjunto de funcionalidades HTTP que se han rediseñado teniendo en cuenta la baja potencia de procesamiento y las restricciones de consumo de energía de los pequeños dispositivos embebidos, como los sensores. Además, se han modificado varios mecanismos y se han agregado algunas funcionalidades nuevas para que el protocolo sea adecuado para las aplicaciones IoT. Las pilas de protocolos HTTP y CoAP se ilustran en la Figura 2.

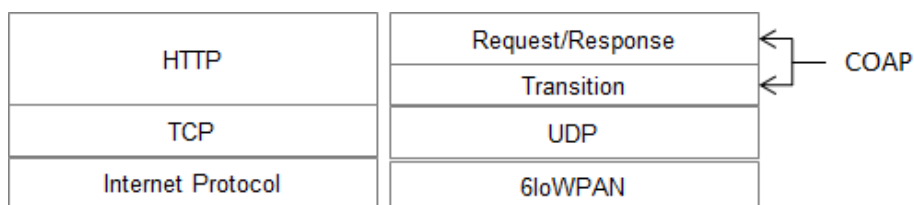


Fig 2: Pila de protocolos HTTP y CoAP

## 2.4 Seguridad para IoT

Ha quedado claro que IoT no funcionará sin una adecuada seguridad. En consecuencia, la mayoría de los nuevos grupos de trabajo de IoT se han agregado en el Área de Seguridad. El grupo DTG en entornos restringidos (DICE - DTLS In Constrained Environments) [27] (ya finalizado) produjo un perfil TLS/DTLS que es adecuado para dispositivos restringidos de IoT (RFC 7925) [28]. El grupo de trabajo de Autenticación y Autorización para Entornos Limitados (ACE - Authentication and Authorization for Constrained Environments) [29] está trabajando en mecanismos de autorización autenticados para acceder a recursos alojados en servidores en entornos restringidos y recientemente se completó un documento de caso de uso completo (RFC 7744) [30]. Este trabajo es respaldado por el grupo de trabajo COSE [31], que ha creado análogos CBOR simplificados para los métodos de firma y cifrado de objetos JSON que se desarrollaron en el grupo de trabajo JOSE [32], concluido en 2016.

El RFC 7925 define un perfil de Transport Layer Security (TLS) y Datagram Transport Layer Security (DTLS) 1.2 que ofrece seguridad de comunicaciones para este intercambio de datos, evitando así el espionaje, la manipulación y la falsificación de mensajes. La falta de seguridad de la comunicación es una vulnerabilidad común en los productos de IoT que se puede resolver fácilmente mediante el uso de estos protocolos de seguridad de Internet bien investigados y ampliamente implementados.

## 2.5 6TiSCH: IoT para ambientes industriales

Como un desarrollo especial algo más allá del trabajo habitual de 6Lo, el grupo de trabajo 6TiSCH [33], IPv6 sobre el modo TSCH de IEEE 802.15.4e [34] (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) se constituyó en 2014 para habilitar IPv6 para el modo de tiempo ranurado - salto de canal (TSCH - Time-Slotted Channel Hopping) que se agregó recientemente a redes IEEE 802.15.4. Este grupo de trabajo tiene como objetivo capitalizar las características determinísticas de TSCH, en tiempo real, e incluye aspectos de arquitectura, modelo de información y configuración. En 2015 de publicó el documento de 6TiSCH (RFC 7554) [35] que describe el entorno, la declaración del problema y los objetivos para usar el método Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) en el contexto de Low-Power y Lossy Networks (LLNs).

La Figura 3 muestra la pila del protocolo 6TiSCH. Está compuesto por estándares desarrollados por el IEEE y el IETF. En conjunto, estos estándares logran una conectividad de extremo a extremo basada en IPv6 al tiempo que cumplen con el determinismo, la solidez y la operación de baja potencia requeridas para los dispositivos operados por batería destinados a aplicaciones de monitoreo y control de procesos industriales

App1	App2	App3
IETF CoAP		
IETF RPL		
IETF 6LoWPAN		
IETF 6P (6 TiSCH)		
IEEE802.15.4 MAC (TSCH)		
IEEE802.15.4 PHY		

Fig 3: La pila de protocolos IETF 6TiSCH, compuesta por IEEE 802.15.4, IETF 6P, 6LoWPAN, RPL y CoAP.

## 2.6 Nuevas iniciativas aplicadas a IoT

Además de los nuevos protocolos y otros mecanismos desarrollados por los grupos de trabajo del IETF, los protocolos de Internet para entornos restringidos a menudo se benefician de una guía adicional para técnicas de implementación eficientes y otras consideraciones. El grupo de trabajo de LWIG (Lightweight Implementation Guidance) [36] está trabajando en dichos documentos, incluidos algunos para los protocolos CoAP e IKEv2 [37], aspectos de eficiencia energética [38] y CoAP en redes celulares [39]. El grupo de trabajo LWIG publicó RFC 7228 [40], que define terminología común para redes de nodo restringido.

Paralelamente al trabajo de estandarización de IETF, dos grupos de investigación de IRTF son de especial interés: ICNRG (Information-Centric Networking) [41] que explora la aplicabilidad de sus tecnologías para escenarios IoT, y T2TRG (Thing-to-Thing Research Group) [42], que trata temas de investigación abiertos para hacer realidad una verdadera "Internet de las Cosas", una Internet donde los nodos de bajos recursos ("cosas", "nodos restringidos") pueden comunicarse entre ellos y con Internet, para participar sin permiso innovación

Finalmente, la Junta de Arquitectura de Internet (IAB - Internet Architecture Board) [43] está organizando varios talleres relacionados (por ejemplo, sobre seguridad, arquitectura e interoperabilidad semántica) y ha publicado documentos informativos como "Consideraciones arquitectónicas en Smart Object Networking" (RFC 7452) [44].

## 2.7 Conclusiones

El IETF ya cuenta con una década de historia especificando y documentando los estándares y directrices clave de IoT, y hoy en día hay más actividad que nunca alrededor de IoT. Otras organizaciones y consorcios que trabajan en IoT han adoptado la pila de protocolos de Internet como base de sus soluciones. IP y específicamente

IPv6 son la elección obvia para la creación de redes, pero el resto de la pila de IETF IoT, incluidos CoAP y DTLS, también se utilizan ampliamente. La pila de protocolo IETF IoT base, tal como se publica hoy en los RFC, es madura y adecuada para su implementación. Las necesidades adicionales están surgiendo para la estandarización, y los grupos activos en el IETF y el IRTF están trabajando arduamente para garantizar que sean identificados y abordados.

## Referencias

- [1] Karen Rose, Scott Eldridge, Lyman Chapin, "LA INTERNET DE LAS COSAS — UNA BREVE RESEÑA", © 2015 Internet Society (ISOC), Octubre de 2015
- [2] Internet Engineering Task Force IETF, <https://ietf.org/>
- [3] Internet Research Task Force (IRTF), <https://irtf.org/>
- [4] IPv6 over Low power WPAN (6lowpan), <https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>,
- [5] IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>,
- [6] J. Hui, Ed., "Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks", RFC 6282, IETF, September 2011
- [7] Zach Shelby, Carsten Bormann, "6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet", edition first, published 2009, John Wiley & Sons Ltd
- [8] IPv6 over Networks of Resource-constrained Nodes (6lo), <https://datatracker.ietf.org/wg/6lo/about/>, consultado
- [9] J. Nieminen et al, "IPv6 over BLUETOOTH(R) Low Energy", RFC 7668, IETF, October 2015
- [10] A. Brandt et al, "Transmission of IPv6 Packets over ITU-T G.9959 Networks", RFC 7428, IETF February 2015
- [11] P. Mariager ET AL, "Transmission of IPv6 Packets over Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) Ultra Low Energy (ULE)", RFC 8105, IETF, May 2017
- [12] K. Lynn, Ed., "Transmission of IPv6 over Master-Slave/Token-Passing (MS/TP) Networks", RFC 8163, IETF May 2017
- [13] Y. Choi, Ed., "Transmission of IPv6 Packets over Near Field Communication", draft-ietf-6lo-nfc-09, IETF, January 8, 2018
- [14] J. Hou, "Transmission of IPv6 Packets over PLC Networks", draft-hou-6lo-plc-03, IETF, December 11, 2017
- [15] MS. Akbar, "Transmission of IPv6 Packets over Wireless Body Area Networks (WBANs)", draft-sajjad-6lo-wban-01, IETF, October 30, 2017
- [16] Routing Over Low power and Lossy networks (roll), <https://datatracker.ietf.org/wg/roll/about/>
- [17] T. Winter, Ed., "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", RFC 6550, IETF, March 2012
- [18] JP Vasseur et al, "RPL: The IP routing protocol designed for low power and lossy networks", Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance, April 2011
- [19] Constrained RESTful Environments (core), <https://datatracker.ietf.org/wg/core/about/>
- [20] Z. Shelby, C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP)", RFC 7252, IETF, June 2014
- [21] A. Rahman, Ed., "Group Communication for the Constrained Application Protocol (CoAP)", RFC 7390, IETF, October 2014
- [22] K. Hartke, "Observing Resources in the Constrained Application Protocol (CoAP)", RFC 7641, IETF, September 2015
- [23] Z. Shelby, "Constrained RESTful Environments (CoRE) Link Format", RFC 6690, IETF, August 2012

- [24] C. Bormann, P. Hoffman, "Concise Binary Object Representation (CBOR)", RFC 7049, IETF, October 2013
- [25] T. Bray, Ed., "The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format", RFC 8259, IETF, December 2017
- [26] W. Colitti, K. Steenhaut, N. De Caro, "Integrating Wireless Sensor Networks with the Web", IPSO, 2011
- [27] DTLS In Constrained Environments (dice), <https://datatracker.ietf.org/wg/dice/about/>
- [28] H. Tschofenig, Ed., "Transport Layer Security (TLS) / Datagram Transport Layer Security (DTLS) Profiles for the Internet of Things", RFC 7925, IETF, July 2016
- [29] Authentication and Authorization for Constrained Environments (ace), <https://datatracker.ietf.org/wg/ace/about/>
- [30] L. Seitz, Ed. "Use Cases for Authentication and Authorization in Constrained Environments" RFC 7744, IETF, January 2016
- [31] CBOR Object Signing and Encryption (cose), <https://datatracker.ietf.org/wg/cose/about/>
- [32] Javascript Object Signing and Encryption (jose), <https://datatracker.ietf.org/wg/jose/about/>
- [33] IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e (6tisch), <https://datatracker.ietf.org/wg/6tisch/about/>
- [34] IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011), <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4e-2012.html>
- [35] T. Watteyne, Ed., "Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement", RFC 7554, IETF, May 2015
- [36] Light-Weight Implementation Guidance (lwig), <https://datatracker.ietf.org/wg/lwig/about/>
- [37] T. Kivinen, "Minimal Internet Key Exchange Version 2 (IKEv2) Initiator Implementation", RFC 7815, IETF, March 2016
- [38] C. Gomez, M. Kovatsch, Z. Cao, Ed., "Energy-Efficient Features of Internet of Things Protocols", RFC 8352, IETF, April 2018
- [39] J. Arkko, A. Keranen, "Building Power-Efficient CoAP Devices for Cellular Networks", draft-ietf-lwig-cellular-06, IETF, January 4, 2016
- [40] C. Bormann, M. Ersue, A. Keranen, "Terminology for Constrained-Node Networks", RFC 7228, IETF, May 2014
- [41] Information-Centric Networking Research Group (ICNRG), <https://irtf.org/icnrg>
- [42] Thing-to-Thing Research Group (T2TRG), <https://irtf.org/t2trg>
- [43] Internet Architecture Board, <https://www.iab.org/>
- [44] H. Tschofenig, J. Arkko, D. McPherson, "Architectural Considerations in Smart Object Networking", RFC 7452, IAB, March 2015