

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

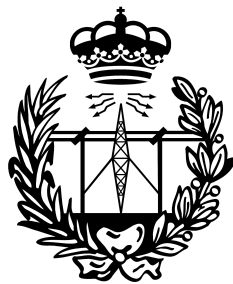
Diseño e implementación de protocolo
de control escalable en redes IoT para
entornos 6G

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

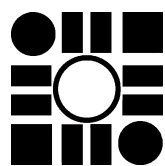
Autor: David Carrascal Acebron

Tutor: Elisa Rojas Sánchez

2022



Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación



Universidad
de Alcalá

Madrid, 24 de octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

**Diseño e implementación de protocolo
de control escalable en redes IoT para entornos 6G**

Autor: David Carrascal Acebron

Tutor: Elisa Rojas Sánchez

Tribunal:

Presidente: Juan Antonio Carral Pelayo

Vocal 1º: José Manuel Rodríguez Ascáriz

Vocal 2º: Elisa Rojas Sánchez

*A mis hermanas, Natalia y Violeta,
quienes día a día, por oscura que sea la noche,
arrojan luz y esperanza a mi vida.*

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciendo y reconociendo a mi tutora, Elisa Rojas, sin la cual este trabajo no habría sido posible. Quien desde segundo de carrera creyó en mi, y aun día de hoy, sigue apostando día a día en mis capacidades, incluso cuando ni yo mismo soy capaz de verlas. Su destreza y conocimiento, su apoyo incondicional y carisma, su maestría y pasión por lo que hace, y a lo que se dedica, han hecho que etapa, tras etapa académica siga aprendiendo y disfrutando como el primer día. Este trabajo ha sido financiado por subvenciones de la Comunidad de Madrid a través de los proyectos TAPIR-CM (S2018/TCS-4496) y MistLETOE-CM (CM/JIN/2021-006), y por el proyecto ONENESS (PID2020-116361RA-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

También me gustaría agradecer a mi familia, por su cariño, comprensión e inspiración en estos meses que han sido tan duros para mi. Y que decir de mis amigos, a los *Caye de Calle*, a los *C de Chill*, a mis estimados *Pueblerinos*, como no, a Pablo y Olga, a mis queridas Noci, a mi señor abuelo de confianza, Bobby, a la señorita Laura de Diego, mis compis de la uni y toda la gente nueva que ha llegado a mi vida durante estos meses, a todos vosotros, gracias por las risas y los buenos momentos que hemos compartido juntos. Gracias de verdad.

No puedo terminar sin agradecer a toda la gente del Laboratorio LE34, quienes me alentarono a seguir por este arduo camino de la investigación y quienes con sus consejos y experiencias han ido conformando al ingeniero que soy a día de hoy.

Sinceramente, mil gracias a todos.

Resumen

En este Trabajo Final de Máster (TFM) se presenta el diseño e implementación de un protocolo de control escalable de redes Internet of Things (IoT) para entornos Software-Defined Networking (SDN) en la nueva generación de redes móviles, the sixth generation of mobile technologies (6G). Dicho protocolo de control seguirá un paradigma de control de tipo *in-band*, con el cual se dotará de conectividad a los nodos de la red con el ente de control, empleando el plano de datos para la transmisión de información de control.

En aras de completar el proyecto, se ha partido por analizar las necesidades y características de las distintas tecnologías que se emplearán en ejecución del objetivos predefinidos y así discernir aquellas herramientas necesarias para la implementación del protocolo control. Una vez seleccionadas las herramientas, se estudiarán a fondo para realizar una implementación lo optimizada en la medida de lo posible. Este proyecto concluirá con la validación mediante emulación del protocolo desarrollado para comprobar el correcto funcionamiento del mismo en distintos casos de uso.

Palabras clave: 6G; IoT; SDN; Control in-band; Plano de control

Abstract

In this Master's Thesis (TFM) we present the design and implementation of a scalable control protocol for Internet of Things (IoT) networks for Software-Defined Networking (SDN) environments in the new generation of mobile networks, the sixth generation of mobile technologies (6G). This control protocol will be based on an *in-band* control paradigm, which will provide connectivity between the network nodes and the control entity, using the data plane for the transmission of control information.

In order to fulfil the project, we have started by analysing the requirements and characteristics of the different technologies that will be used in the execution of the predefined objectives and thus be able to determine the tools necessary for the implementation of the control protocol. Once the tools have been selected, they will be studied in depth in order to carry out an optimised implementation as far as possible. This project will conclude with the validation the developed protocol by means of emulation to check its correct operation in different use cases.

Keywords: 6G; IoT; SDN; In-band control; Control plane

“No hay ningún viento favorable para el que no sabe a que puerto se dirige”

Arthur Schopenhauer.

Índice general

Resumen	v
Abstract	vii
1 Introducción	1
1.1 El Internet de las Cosas y la red 6G	1
1.2 Redes SDN	1
1.3 Objetivos	1
1.4 Estructura del TFM	1
1.5 Contribuciones	1
Bibliografía	3

Índice de figuras

Índice de tablas

Índice de Códigos

1 Introducción

En este primer capítulo, se desea presentar de manera concisa los aspectos más relevantes del TFM, como son, las redes de dispositivos IoT, la llegada de los entornos 6G, y la tecnología habilitadora en dichos entornos, el SDN. Se explorarán las necesidades actuales de las redes de sensores IoT, se explorará la postulada nueva generación de redes móviles, 6G, y se verá donde entrará las redes SDN, y qué mejoras deberán hacerse para hacer frente a las necesidades imperantes de las próximas redes de sensores.

Se establecerán objetivos claros para el TFM y se describirá detalladamente cómo se planea llevarlos a cabo cada uno de ellos. Estos objetivos ayudarán a al diseño y desarrollo de un nuevo protocolo de comunicación de control escalable para redes de sensores en un ámbito de red SDN. De forma adicional, se presentará la estructura general del TFM, describiendo de manera breve los temas que se abordarán en cada capítulo. Por último, se indicarán las contribuciones en revistas científicas de este proyecto.

1.1 El Internet de las Cosas y la red 6G

1.2 Redes SDN

1.3 Objetivos

1.4 Estructura del TFM

1.5 Contribuciones

Este TFM ha proporcionado significativas contribuciones a la comunidad científica, incluyendo dos publicaciones en revistas de alto impacto indexadas en el JCR (2 Q2), un tercer trabajo en revisión (Q2). A continuación, se presentan estas contribuciones en resumen.

Artículos de revistas científicas de alto impacto.

1. Rojas, E., Hosseini, H., Gomez, C., **Carrascal, D.** and Cotrim, J.R., 2021. Outperforming RPL with scalable routing based on meaningful MAC addressing. Ad Hoc

- Networks, 114, p.102433. (JCR **Q2**)
2. Alvarez-Horcajo, J., Martinez-Yelmo, I., Rojas, E., Carral, J.A. and **Carrascal, D.**, 2022. ieHDDP: An Integrated Solution for Topology Discovery and Automatic In-Band Control Channel Establishment for Hybrid SDN Environments. *Symmetry*, 14(4), p.756. (JCR **Q2**)
 3. **Carrascal, D.**, Rojas, E., Lopez-Pajares, D., Alvarez-Horcajo, J. and Carral, J.A., 2023. A Comprehensive Survey of In-Band Control in SDN: Challenges and Opportunities. *Electronics*, under review. (JCR **Q2**)
-

Bibliografía

- [1] A. Celesti, D. Mulfari, M. Fazio, M. Villari, and A. Puliafito, “Exploring container virtualization in iot clouds,” in *2016 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, 2016, pp. 1–6.
- [2] M. Capra, R. Peloso, G. Masera, M. Ruo Roch, and M. Martina, “Edge computing: A survey on the hardware requirements in the internet of things world,” *Future Internet*, vol. 11, no. 4, p. 100, 2019.
- [3] M. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, “A sdn-iot architecture with nfv implementation,” in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–6.
- [4] M. Uddin, S. Mukherjee, H. Chang, and T. V. Lakshman, “Sdn-based multi-protocol edge switching for iot service automation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 12, pp. 2775–2786, 2018.
- [5] M. Gast, *“802.11 wireless networks: the definitive guide”*. O’Reilly Media, Inc., 2005.
- [6] A. Kato, M. Takai, and S. Ishihara, “Design and implementation of a wireless network tap device for ieee 802.11 wireless network emulation,” in *2017 Tenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*, 2017, pp. 1–6.
- [7] M. Vipin and S. Srikanth, “Analysis of open source drivers for ieee 802.11 wlans,” in *2010 International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing (ICWCSC)*, 2010, pp. 1–5.
- [8] M. Kerrisk, *Namespaces (7) - overview of Linux namespaces*, The Linux man-pages project, May 2020.
- [9] Michael Kerrisk, *Network namespaces - overview of Linux network namespaces*, The Linux man-pages project, June 2020.
- [10] M. Kerrisk, *veth - Virtual Ethernet Device*, The Linux man-pages project, June 2020.
- [11] B. Lantz, B. Heller, and N. McKeown, “A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks,” in *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2010, pp. 1–6.

-
- [12] B. Heller, “Reproducible network research with high-fidelity emulation,” Ph.D. dissertation, Stanford University, 2013.
 - [13] T. Høiland-Jørgensen, J. D. Brouer, D. Borkmann, J. Fastabend, T. Herbert, D. Ahern, and D. Miller, “The express data path: Fast programmable packet processing in the operating system kernel,” in *Proceedings of the 14th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies*, ser. CoNEXT ’18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, p. 54–66. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3281411.3281443>
 - [14] W. Tu, F. Ruffy, and M. Budiu, “Linux network programming with p4,” in *Linux Plumbers’ Conference 2018*, 2018.
 - [15] P. Bosshart, D. Daly, G. Gibb, M. Izzard, N. McKeown, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talayco, A. Vahdat, G. Varghese *et al.*, “P4: Programming protocol-independent packet processors,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 3, pp. 87–95, 2014.
 - [16] B. O. Stephen Ibanez and M. Arashloo, “P4 tutorials,” in *P4 Tutorials ACM SIGCOMM August 2019*, 2019.
 - [17] D. Hanes, G. Salgueiro, P. Grossetete, R. Barton, and J. Henry, *IoT fundamentals: Networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things*. Cisco Press, 2017.
 - [18] V. Gazis, M. Goertz, M. Huber, A. Leonardi, K. Mathioudakis, A. Wiesmaier, and F. Zeiger, “Short paper: Iot: Challenges, projects, architectures,” in *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, 2015, pp. 145–147.
 - [19] M. U. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, and T. Kamal, “A review on internet of things (iot),” *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, no. 1, pp. 1–7, 2015.
 - [20] T. D. Nadeau and K. Gray, *SDN: Software Defined Networks: an authoritative review of network programmability technologies*. ” O’Reilly Media, Inc.”, 2013.
 - [21] D. Levy and N. McKeown, “Overhaul may bring better, faster internet to 100 million homes,” *Stanford University News*, 2003.
 - [22] “Onf overview,” <https://www.opennetworking.org/mission/>, accessed: 2020-06-10.
 - [23] R. R. Fontes, S. Afzal, S. H. B. Brito, M. A. S. Santos, and C. E. Rothenberg, “Mininet-wifi: Emulating software-defined wireless networks,” in *2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2015, pp. 384–389.
-

-
- [24] I. GitHub, “Github,” URL: <https://github.com/>, 2016.
 - [25] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voigt, “Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors,” in *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 2004, pp. 455–462.
 - [26] A. Kurniawan, *Practical Contiki-NG: Programming for Wireless Sensor Networks*. Apress, 2018.
 - [27] “Cooja simulator,” https://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Cooja_Simulator, accessed: 2020-06-10.
 - [28] “Json standard,” <https://www.json.org/>, accessed: 2020-06-26.
 - [29] P. L. Consortium *et al.*, “Behavioral model (bmv2),” URL: <https://github.com/p4lang/behavioral-model> [cited 2020-01-21], 2018.
 - [30] “Wpan arch.” <https://github.com/linux-wpan/wpan-misc/tree/master/architecture>, accessed: 2020-06-26.
 - [31] C. L. Devasena, “Ipv6 low power wireless personal area network (6lowpan) for networking internet of things (iot)–analyzing its suitability for iot,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 30, pp. 1–6, 2016.
 - [32] “Terminology for constrained-node networks,” <https://tools.ietf.org/html/rfc7228>, accessed: 2020-06-30.
 - [33] “Mininet-iot,” <https://github.com/ramonfontes/mininet-iot>, accessed: 2020-07-01.
 - [34] “Traffic control - debian,” <https://wiki.debian.org/TrafficControl>, accessed: 2020-06-30.
-

