

Aplicaciones de *blockchain* en IoT y computación en la niebla

María Blanca Caminero

MariaBlanca.Caminero@uclm.es / <https://orcid.org/0000-0003-3312-7393>

Carlos Núñez-Gómez

carlos.nunez@uclm.es / <https://orcid.org/0000-0002-7899-1321>

Carmen Carrión

carmen.carrion@uclm.es

Departamento de Sistemas Informáticos, E. S. de Ingeniería Informática
Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A)
Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España

Recibido: 30/7/2021 Aceptado: 1/9/2021

doi: <https://doi.org/10.26439/ciis2021.5548>

RESUMEN. Desde su concepción en el 2008, la tecnología *blockchain* ha causado un gran interés en los últimos años. La aplicación inicial fue en el ámbito de las criptomonedas, dando soporte a Bitcoin. Este hecho ya de por sí supuso una revolución en el ámbito de la economía, pues la tecnología hacía posible prescindir de intermediarios (es decir, bancos y entidades financieras) en las transacciones económicas, ahorrando costes y evitando un control centralizado de la información registrada en la *blockchain*. Más adelante, la tecnología ha evolucionado para incluir sobre ella la posibilidad de registrar lógica de negocio (es decir, código informático) en la propia *blockchain* a través de los contratos inteligentes. Esto, junto con el desarrollo de plataformas que permiten implementar *blockchains* con acceso controlado, ha abierto la puerta a un sinfín de aplicaciones más allá de las criptomonedas. Por otro lado, el concepto de internet de las cosas (IoT, en inglés), donde objetos cotidianos se conectan a internet, generando cantidades ingentes de datos que procesar (usualmente en lo que se conoce como computación en la niebla), es un campo de investigación e innovación que también ha generado gran interés de la industria y la academia en los últimos años. Las tecnologías IoT suponen un complemento perfecto para dotar de conexión con el mundo real a la información almacenada en la *blockchain*. En este trabajo realizaremos una breve introducción a *blockchain* y al internet de las cosas y revisaremos algunas aplicaciones que combinan ambas temáticas. Finalizaremos con una pequeña introducción a la línea de investigación sobre blockchain en entornos IoT

que llevamos a cabo en el Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A) de la Universidad de Castilla-La Mancha.

PALABRAS CLAVE: *blockchain* / internet de las cosas / contratos inteligentes
/ computación en la niebla

BLOCKCHAIN APPLICATIONS IN IOT AND COMPUTING IN THE FOG

ABSTRACT. Since its inception in 2008, blockchain technology has attracted great interest in various fields in recent years. The initial application was in the field of cryptocurrencies, supporting Bitcoin. This fact in itself was a revolution in economics since technology made it possible to dispense with intermediaries (that is, banks and financial entities) in economic transactions, saving costs and avoiding a centralized control of the information registered in the blockchain. Later, the technology has evolved to include the possibility of registering business logic (that is, computer code) in the blockchain through smart contracts. This, together with the development of platforms that allow the implementation of blockchains with controlled access, has opened the door to a myriad of applications beyond cryptocurrencies.

On the other hand, the concept of the Internet of Things (IoT), where everyday objects are connected to the Internet, generating huge amounts of data to process (usually in what is known as computing in the fog), is a field of research and innovation that has also generated great interest from industry and academia in recent years. IoT technologies are a perfect complement to connect the real world to the information stored on the blockchain. This work will briefly introduce blockchain and the Internet of Things and review some applications that combine both themes. We will end with a short introduction to the line of research on blockchain in IoT environments that we carry out at the Albacete Computer Research Institute (I3A) of the University of Castilla-La Mancha.

KEYWORDS: blockchain / Internet of Things / smart contracts / fog computing

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la tecnología *blockchain* está siendo el foco de atención en diversos y variados ámbitos. *Blockchain* se introdujo en el marco de la criptomoneda Bitcoin en el 2008 (Nakamoto, 2008). Su potencial para llevar a cabo transacciones totalmente descentralizadas, sin intermediarios y sin posibilidad de modificarlas indebidamente, debido a sus propiedades criptográficas, ha supuesto un revulsivo en el campo de la economía. En el 2015, la introducción de la plataforma de *blockchain* Ethereum (Buterin, 2013) incluía el concepto de contratos inteligentes o *smart contracts*. Estos permiten implementar lógica de negocio sobre la infraestructura *blockchain*, emulando así un computador totalmente distribuido. Esta lógica de negocio hereda las características de no inmutabilidad que ofrece *blockchain*, por lo que abre nuevos campos de aplicación en muy diversos ámbitos (trazabilidad alimentaria, identidad digital, etcétera).

Por otro lado, otro concepto que ha experimentado un gran auge es el de internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Según la web Statista, en el 2030 se estima que habrá 50 000 millones de dispositivos conectados a internet a nivel mundial. Hoy en día existen multitud de objetos cotidianos conectados a internet (*wearables*, asistentes inteligentes, lavadoras, cafeteras, aspiradores...). Además, dispositivos empleados en diferentes industrias también pueden conectarse a internet (diferentes tipos de sensores y actuadores en agricultura y ganadería, en logística y transporte, en procesos industriales, en vehículos autónomos). Todo esto abre la posibilidad de tratar de manera inteligente la enorme cantidad de datos generados para obtener un valor de estos (Balaji *et al.*, 2019). Este procesamiento suele hacerse llevándolos a recursos ubicados en la nube, debido a su potencialmente infinita disponibilidad de recursos de cómputo y de almacenamiento. Sin embargo, existen aplicaciones donde este enfoque basado en la nube no es viable, debido a diversos factores, como el ancho de banda consumido al llevar datos a la nube, las latencias incurridas en el proceso o la posibilidad de desconexión de internet en entornos móviles. Es por ello que surge el paradigma de computación en la niebla, donde se proveen de recursos más cercanos a las fuentes de datos con el fin de realizar el procesamiento de estos con menores latencias y consumos de ancho de banda. La computación en la niebla hace uso de diversos dispositivos cercanos al borde de la red, como pasarelas IoT, encaminadores inteligentes, ordenadores monoplaca de bajo coste (por ejemplo, Raspberry Pis), ordenadores personales e incluso microcentros de datos para procesar los datos IoT. En este trabajo se pretende dar una visión acerca de cómo se puede integrar *blockchain* en el contexto de las aplicaciones IoT. La naturaleza eminentemente distribuida de la tecnología de computación en la niebla que da soporte a las aplicaciones IoT abre una serie de desafíos en cuanto a seguridad, disponibilidad y tolerancia a fallos que *blockchain* puede ayudar a mitigar.

Este trabajo se organiza como se detalla a continuación. En la sección 1 se introduce el tema objeto del trabajo y se motiva brevemente. En la sección 2 se describirán los conceptos básicos detrás de las tecnologías de *blockchain*, internet de las cosas y computación en la niebla.

La sección 3 detallará algunos ejemplos de casos de uso donde se combinen estas tecnologías. La sección 4 resumirá la investigación sobre la temática de *blockchain* en entornos IoT y computación en la niebla, desarrollada en el I3A de la UCLM. La sección 5 concluye el trabajo.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

La tecnología *blockchain* (Nakamoto, 2008) es capaz de almacenar datos de forma distribuida garantizando su integridad y disponibilidad, a través de redes *peer-to-peer* (P2P) subyacentes que se utilizan para conectar los nodos participantes sin necesidad de terceros. Una cadena de bloques consiste en una estructura de datos que encapsula los datos dentro de las transacciones¹. Estas transacciones se envían a toda la red P2P en un proceso de difusión y se agrupan en bloques. Estos bloques se encadenan mediante una función *hash* criptográfica y se ordenan en el tiempo, formando una gran base de datos o libro de contabilidad distribuido (*distributed ledger*, en inglés).

Hay diferentes tipos de cadenas de bloques, como las cadenas de bloques sin permiso (*permissionless*) y con permiso (*permissioned*). Las cadenas de bloques sin permiso permiten la participación de cualquier entidad del mundo, lo que descentraliza el control y el mantenimiento de la cadena de bloques. Además, la información almacenada es pública y puede ser consultada por cualquier entidad, lo que aumenta la transparencia. La *blockchain* de Bitcoin pertenece a esta clase. Por otro lado, las *blockchains* con permiso se centran en casos de uso local y privado en los que se requiere un mayor rendimiento, control y privacidad. Solo las entidades autorizadas pueden participar en una *blockchain* con permiso. Esto significa que el control de la *blockchain* está menos distribuido, pero mejora la escalabilidad y la velocidad de la red (Ali *et al.*, 2019). Como la *blockchain* difunde las transacciones entre todos los participantes, se requiere un algoritmo de consenso para descentralizar el control de esta, asegurando la aplicación de ciertas reglas a todos los nodos participantes. Ejemplos de algoritmos de consenso son *proof-of-work* (PoW) y *proof-of-authority* (PoA), utilizados en *blockchains* sin y con permiso, respectivamente. En PoW, los nodos de la cadena de bloques compiten para generar nuevos bloques y añadirlos a la cadena. La competición se basa en el cálculo de costosas operaciones de *puzzle* criptográfico (generación y búsqueda de *hashes*). Este proceso se conoce como minería y las entidades que lo ejecutan se llaman mineros. Por otro lado, en PoA, un conjunto de nodos de confianza actúa por turnos en un esquema de rotación como validadores de bloques y transacciones, distribuyendo la responsabilidad de la creación de bloques entre todos los nodos de confianza. Se puede encontrar más información sobre estos y otros algoritmos de consenso populares en De Angelis *et al.* (2018) y Ferdous *et al.*, (2020).

1 Una transacción se define como un evento atómico, indivisible. Por ejemplo, reducir en 10 euros la cuenta de A y aumentar en 10 euros la cuenta de B sería una transacción (A paga 10 euros a B).

Ethereum (Buterin, 2013) es una de las plataformas *blockchain* más populares. Las transacciones de la *blockchain* se procesan a través de la máquina virtual de Ethereum (EVM), que es capaz de ejecutar *scripts* personalizados llamados contratos inteligentes. Los contratos inteligentes (Szabo, 1996) se desarrollan con lenguajes de alto nivel, como Solidity (<https://solidity-es.readthedocs.io/es/latest/>) y se almacenan dentro de las transacciones. Por lo tanto, es imposible modificar un contrato inteligente una vez desplegado. Una de las implementaciones más importantes de la plataforma Ethereum es Geth. Está escrito en el lenguaje de programación Go (<https://golang.org/>) y está disponible para la gran mayoría de arquitecturas y sistemas operativos (incluidos Android e iOS). Geth permite participar en *blockchains* sin permisos como la red principal de Ethereum, pero también permite crear *blockchains* con permisos. Actualmente, Geth implementa dos algoritmos de consenso seleccionables para *blockchains* con permiso: un algoritmo PoW llamado Ethash (utilizado por la red principal de Ethereum) y un algoritmo PoA llamado Clique.

Por otro lado, el concepto de internet de las cosas (IoT) (Borgia, 2014) ha surgido recientemente como un paradigma informático que combina diferentes tecnologías, como la computación ubicua, los protocolos específicos de internet, las redes de sensores inalámbricos, las tecnologías de comunicación y los sistemas embebidos, por nombrar algunos. IoT está causando un gran impacto en la sociedad debido a sus innumerables aplicaciones en la industria, la salud, la agricultura, etcétera. Las aplicaciones de IoT suelen aprovechar los recursos de computación en la nube (*cloud computing*) para extraer valor de la enorme cantidad de datos recogidos por las "cosas". Sin embargo, este enfoque no es viable para algunas aplicaciones debido a las latencias desde/hacia la nube o al ancho de banda que se desperdicia al transferir todos los datos a la nube para su procesamiento. Así, el concepto de computación en la niebla (*fog computing*) (Dastjerdi *et al.*, 2016; Yousefpour *et al.*, 2019) surge como un medio para acercar los recursos de almacenamiento y computación al lugar donde se generan los datos.

Por tanto, la idea principal de la computación en la niebla es apoyar la computación en la proximidad de la fuente de los datos. La estructura distribuida de la computación en la niebla soporta la heterogeneidad, proporciona una baja latencia y mejora la calidad del servicio (QoS) de las aplicaciones en tiempo real y sensibles a la latencia. Sin embargo, la necesidad de una gestión eficiente de los recursos, las técnicas de descarga y los problemas de seguridad siguen siendo retos pendientes.

3. **BLOCKCHAIN EN ENTORNOS DE COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA PARA IoT**

La estructura distribuida inherente a las tecnologías de computación en la niebla para IoT y *blockchain* ha motivado la propuesta de entornos que integran *blockchain* en dichas arquitecturas para proporcionar propiedades mejoradas al IoT (Baniata y Kertesz, 2020; Yang *et al.*,

2019). La mayoría de estas soluciones utilizan *blockchain* para la gestión de datos y la autenticación con el fin de resolver los problemas de seguridad y privacidad y proporcionar una alta fiabilidad (Singh *et al.*, 2020). Los contratos inteligentes también pueden desplegarse entre los clientes y los proveedores de servicios para validar el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio (SLA) para el uso de recursos bajo demanda (Kochovski *et al.*, 2020). A continuación, se revisarán algunas propuestas interesantes.

En Wang *et al.* (2019) se propone un modelo de contribución de recursos de computación de niebla basado en *blockchain*. El modelo aplica un mecanismo de incentivos de recompensa y castigo para animar a los nodos de niebla a contribuir activamente con sus recursos. El modelo propuesto considera un grado de satisfacción (grado de finalización de la tarea) como índice de evaluación del servicio prestado por los proveedores de computación en la niebla. En Pan *et al.* (2019) se desarrolla EdgeChain, un entorno que integra una *blockchain* con permisos y un sistema de gestión de recursos basado en créditos. Los contratos inteligentes se utilizan para regular el comportamiento de los dispositivos IoT y hacer cumplir las normas y políticas de gestión predefinidas. Además, todas las actividades del IoT se registran en la cadena de bloques para el registro y la auditoría seguros de los datos. DualFog-IoT (Memon *et al.*, 2019) es una propuesta para integrar el soporte de las aplicaciones IoT que utilizan *blockchain*. Los autores identifican tres tipos de aplicaciones: en tiempo real (RT), en tiempo no real (NRT) y aplicaciones de *blockchain* tolerantes al retraso (DTB). Su propuesta incluye una infraestructura de niebla separada para procesar las solicitudes DTB, de modo que los procesos de minería no interfieran con el rendimiento de las solicitudes RT y NRT, que se procesan en una infraestructura de niebla convencional. En BlockEdge (Kumar *et al.*, 2020) los autores proponen utilizar *blockchain* como medio para auditar los diferentes procesos involucrados en una aplicación industrial de IoT. Evalúan su propuesta sobre el caso de uso del proceso de construcción de una casa inteligente, donde intervienen diferentes agentes (contratistas, fabricantes) y sobre diferentes procesos industriales (recolección de madera, fabricación de troncos y ladrillos, transporte).

4. HIDRA: ORQUESTANDO CONTENEDORES EN LA NIEBLA MEDIANTE *BLOCKCHAIN*

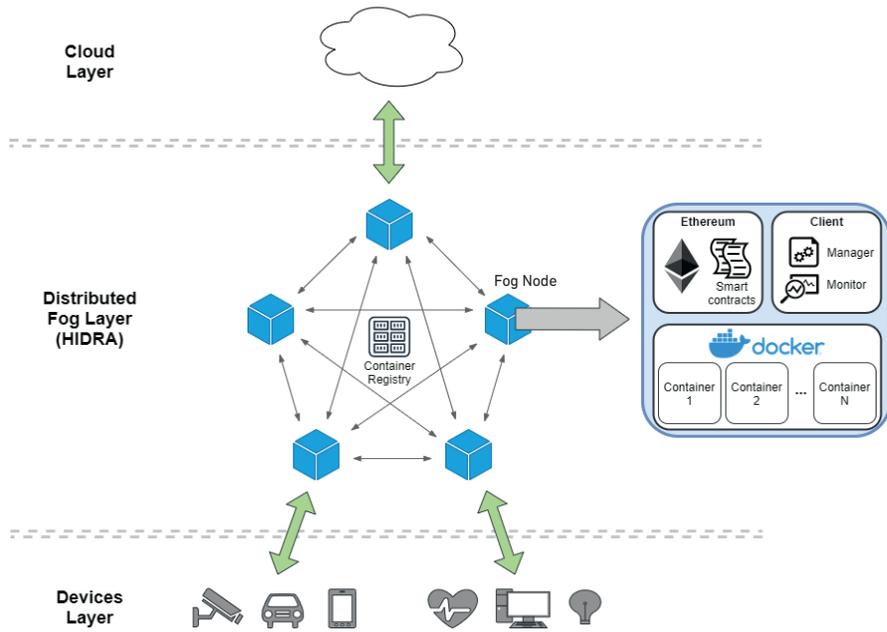
La gestión de recursos de la niebla realiza operaciones administrativas como el despliegue, la virtualización, la supervisión de los nodos que la componen, el equilibrio de la carga, el autoescalado y el aprovisionamiento dinámico de recursos para garantizar la fiabilidad y la disponibilidad del servicio (Hong y Varghese, 2019). En función de cómo se controlan los recursos, las arquitecturas para la gestión de recursos en los sistemas de niebla pueden ser centralizadas o distribuidas. El control centralizado se refiere al uso de un único controlador que toma las decisiones sobre el uso de los recursos del borde. Por el contrario, en una arquitectura distribuida el proceso de toma de decisiones se distribuye entre los nodos de la niebla.

Como se ha comentado anteriormente, los contratos inteligentes sobre *blockchain* pueden verse como un ordenador distribuido que se programa para alcanzar diferentes objetivos dependiendo de la aplicación. Los contratos inteligentes se ejecutan de forma independiente por cada nodo que participa en la cadena de bloques. Este hecho puede ser explotado para implementar un verdadero orquestador distribuido para los nodos de la niebla en entornos IoT, que también proporciona resistencia en caso de fallo o desconexión de los nodos. Esta es la lógica tras HIDRA (Núñez-Gómez *et al.*, 2021), un orquestador de recursos para entornos de computación en la niebla basado en *blockchain*, que se está desarrollando en el grupo de Redes y Arquitecturas de Altas Prestaciones (RAAP) del Instituto de Investigación en Informática de Albacete.

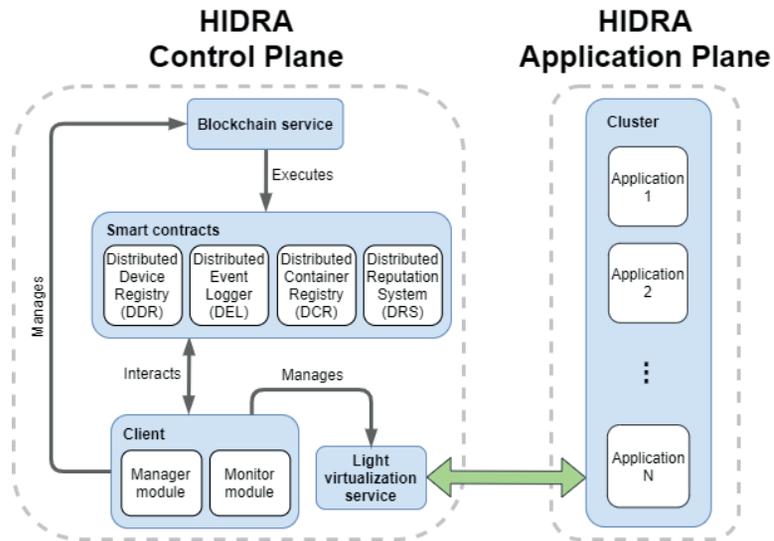
El objetivo de HIDRA (*heterogeneous, interoperable and distributed architecture*) es la orquestación de aplicaciones que se ejecutan en un entorno de computación de niebla, empleando para ello la tecnología *blockchain* y los contratos inteligentes. Las principales características de HIDRA son las siguientes:

- El entorno de niebla considerado es local y privado, es decir, se extiende en un edificio o área similar bajo una única entidad administrativa.
- La arquitectura gestiona de forma autónoma los recursos de los nodos de niebla (CPU, memoria, disco y E/S) y orquesta las aplicaciones en contenedores.
- Todos los nodos de niebla desempeñan la misma función de gestión, especificada por un conjunto de contratos inteligentes, y comparten un estado común del sistema almacenado en la cadena de bloques. Esto significa que no hay un controlador centralizado o un nodo maestro con privilegios especiales.
- El sistema supervisa los valores atípicos en la utilización de los recursos y actualiza la asignación de recursos de acuerdo a reglas preconfiguradas.
- La gestión de recursos incluye la puesta a punto de mecanismos de reputación para identificar los nodos que se comportan mal.

La figura 1(a) muestra una visión general del sistema, incluyendo los componentes que forman parte de la implementación de HIDRA. Más concretamente, HIDRA emplea Docker como gestor de contenedores, la implementación Geth de la *blockchain* de Ethereum y un cliente desarrollado en Go que incluye funciones de monitorización del estado del nodo, así como de gestión y coordinación del resto de componentes (por ejemplo, ejecución de los contratos inteligentes). En la figura 1(b) se muestra la organización interna de HIDRA, con la separación de sus planos de control (donde se encuentran los contratos inteligentes que otorgan a HIDRA su funcionalidad) y de aplicación (que incluye los contenedores donde se ejecutan las aplicaciones IoT).



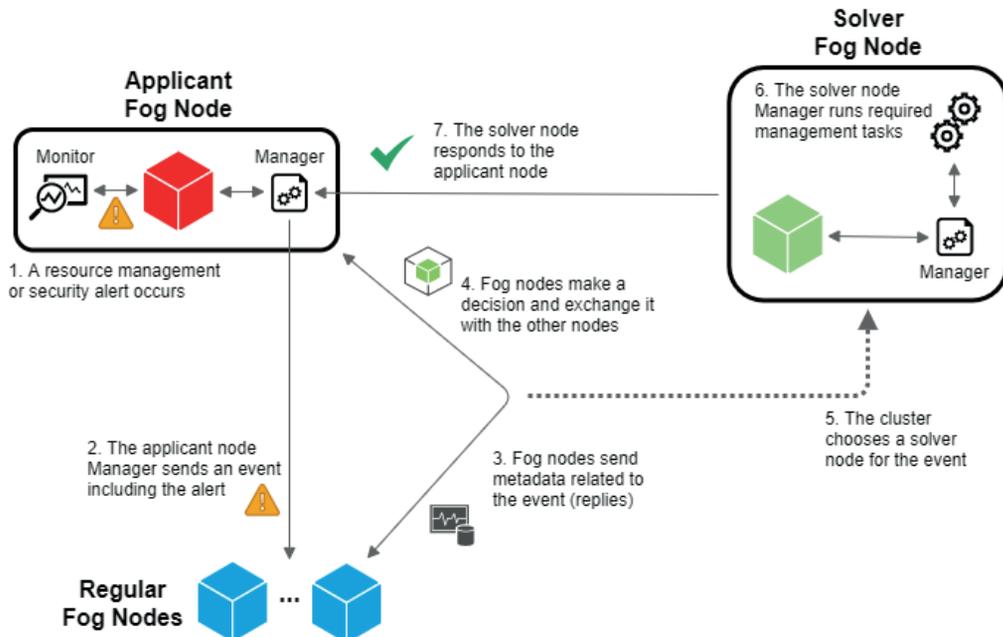
(a) Visión general del sistema



(b) Planos de control y aplicación de HIDRA

Figura 1. Detalles de HIDRA
Fuente: Núñez-Gómez *et al.* (2021)

HIDRA se basa en una *blockchain* privada con permisos donde se implementa el protocolo de consenso PoA. Esto quiere decir que el proceso de validación de transacciones es mucho más ligero que el minado PoW y, por tanto, consume mucha menos energía. Además, se incluye un mecanismo sencillo de reputación en los nodos para poder decidir en todo momento qué nodo(s) se encargan de las tareas de sellado de bloques. El funcionamiento básico de HIDRA se basa en que la *blockchain* almacena el estado global del sistema (estado de cada nodo, contenedores y aplicaciones en ejecución, etcétera). Cada nodo monitoriza su estado continuamente. Cuando detecta una condición anómala (por ejemplo, una sobrecarga de CPU) se generan eventos que provocan la ejecución de los contratos inteligentes. Estos implementan la lógica necesaria para modificar el estado del sistema, de manera que esa condición anómala sea resuelta (por ejemplo, migrando un contenedor desde el nodo sobrecargado a otro nodo con más capacidad disponible). La figura 2(a) esquematiza este proceso.



(a) Flujo de datos de HIDRA



(b) Despliegue de HIDRA en el I3A

Figura 2. Flujo de datos y despliegue de HIDRA

Fuente: Núñez-Gómez *et al.* (2021)

HIDRA se ha implementado sobre placas Raspberry Pi, para emular los nodos de la arquitectura de computación en la niebla a través de dispositivos de bajo coste (ver figura 2[b]). Las pruebas iniciales muestran un bajo consumo de recursos de cálculo y de almacenamiento, incluso en el caso más extremo donde los nodos han de ponerse de acuerdo en la migración de un contenedor a través del intercambio de eventos y transacciones sobre la *blockchain*. Esto demuestra la viabilidad de la propuesta incluso sobre este tipo de dispositivos de coste y prestaciones reducidas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han introducido brevemente algunas tecnologías candentes al día de hoy, como son *blockchain*, internet de las cosas y la computación en la niebla. Su naturaleza intrínsecamente distribuida abre un abanico de posibilidades donde estas tecnologías formen parte de ecosistemas complejos, en los que se exploten las funcionalidades que ofrece cada una de manera óptima. Más concretamente, en un contexto de IoT, donde suele generarse una cantidad inmensa de datos a los que sacar partido a través de su procesamiento, se hace necesario acercar los recursos de cálculo y almacenamiento a los objetos. De ahí, surge el paradigma de computación en la niebla. Por otro lado, la tecnología *blockchain* da soporte a la coordinación de recursos de manera completamente distribuida, entre otras aplicaciones útiles en entornos de computación en la niebla, a través de la ejecución de contratos inteligentes. En particular, se ha presentado el entorno HIDRA, que

supone una propuesta de orquestación de aplicaciones verdaderamente descentralizada y autónoma de los nodos que componen la niebla.

REFERENCIAS

- Ali, M. S., Vecchio, M., Pincheira, M., Dolui, K., Antonelli, F., y Rehmani, M. H. (2019). Applications of Blockchains in the Internet of Things: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(2), 1676-1717. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2886932>
- Balaji, S., Nathani, K., y Santhakumar, R. (2019). IoT Technology, Applications and Challenges: A Contemporary Survey. *Wireless Personal Communications*, 108(1), 363-388. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06407-w>
- Baniata, H., y Kertesz, A. (2020). A Survey on Blockchain-Fog Integration Approaches. *IEEE Access*, 8, 102657-102668. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999213>
- Borgia, E. (2014). The Internet of Things Vision: Key Features, Applications and Open Issues. *Computer Communications*, 54, 1-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>
- Buterin, V. (2013). *A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. Cryptorating. https://cryptorating.eu/whitepapers/Ethereum/Ethereum_white_paper.pdf
- Dastjerdi, A. V., Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., y Buyya, R. (2016). Fog Computing: Principles, Architectures, and Applications. En R. Buyya y A. Vahid Dastjerdi (Eds.), *Internet of Things* (pp. 61-75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6>
- De Angelis, S., Aniello, L., Baldoni, R., Lombardi, F., Margheri, A., y Sassone, V. (2018). *PBFT vs Proof-of-Authority: Applying the CAP Theorem to Permissioned Plockchain*. *Italian Conference on Cyber Security (06/02/18)*. University of Southampton Institutional Repository. <https://eprints.soton.ac.uk/415083/>
- Ferdous, M. S., Chowdhury, M. J. M., Hoque, M. A., y Colman, A. (2020). *Blockchain Consensus Algorithms: A Survey*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2001.07091>
- Go Ethereum. (s. f.). *What is Ethereum?* <https://geth.ethereum.org/>
- Hong, C., y Varghese, B. (2019). Resource Management in Fog/Edge Computing: A Survey on Architectures, Infrastructure, and Algorithms. *ACM Comput. Surveys*, 52(5). <https://doi.org/10.1145/3326066>

- Kochovski, P., Stankovski, V., Gec, S., Faticanti, F., Savi, M., Siracusa, D., y Kum, S. (2020). Smart Contracts for Service-Level Agreements in Edge-to-Cloud Computing. *Journal of Grid Computing*, 18(4), 673-690. <https://doi.org/10.1007/s10723-020-09534-y>
- Kumar, T., Harjula, E., Ejaz, M., Manzoor, A., Porambage, P., Ahmad, I., Liyanage, M., Braeken, A., y Ylianttila, M. (2020). BlockEdge: Blockchain-Edge Framework for Industrial IoT Networks. *IEEE Access*, 8, 154166-154185. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017891>
- Memon, R. A., Li, J. P., Nazeer, M. I., Khan, A. N., y Ahmed, J. (2019). DualFog-IoT: Additional Fog Layer for Solving Blockchain Integration Problem in Internet of Things. *IEEE Access*, 7, 169073-169093. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2952472>
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Bitcoin. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Núñez-Gómez, C., Caminero, B., y Carrión, C. (2021). HIDRA: A Distributed Blockchain-Based Architecture for Fog/Edge Computing Environments. *IEEE Access*, 9, 75231-75251. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082197>
- Pan, J., Wang, J., Hester, A., Alqerm, I., Liu, Y., y Zhao, Y. (2019). EdgeChain: An Edge-IoT Framework and Prototype Based on Blockchain and Smart Contracts. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 4719-4732. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2878154>
- Singh, P., Nayyar, A., Kaur, A., y Ghosh, U. (2020). Blockchain and Fog Based Architecture for Internet of Everything in Smart Cities. *Future Internet*, 12(4), 61. <https://doi.org/10.3390/fi12040061>
- Statista (s. f.). *Dispositivos conectados (internet de las cosas) a nivel mundial de 2019 a 2030 (en miles de millones de unidades)*. <https://es.statista.com/estadisticas/517654/prevision-de-la-evolucion-de-los-dispositivos-conectados-para-el-internet-de-las-cosas-en-el-mundo/>
- Szabo, N. (1996). Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets. *EXTROPY: The Journal of Transhumanist Thought*, (16). https://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart_contracts_2.html
- Tuli, S., Mahmud, R., Tuli, S., y Buyya, R. (2019). FogBus: A Blockchain-based Lightweight Framework for Edge and Fog Computing. *Journal of Systems and Software*, 154, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.04.050>
- Wang, H., Wang, L., Zhou, Z., Tao, X., Pau, G., y Arena, F. (2019). Blockchain-Based Resource Allocation Model in Fog Computing. *Applied Sciences*, 9(24), 5538. <https://doi.org/10.3390/app9245538>

- Yang, R., Yu, F. R., Si, P., Yang, Z., y Zhang, Y. (2019). Integrated Blockchain and Edge Computing Systems: A Survey, Some Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(2), 1508-1532. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2894727>
- Yousefpour, A., Fung, C., Nguyen, T., Kadiyala, K., Jalali, F., Niakanlahiji, A., Kong, J., y Jue, J. P. (2019). All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey. *Journal of Systems Architecture*, 98, 289-330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.009>

