

Arquitecturas Edge-Fog-Cloud en Procesamiento Distribuido. Aspectos de Eficiencia y Resiliencia

Armando De Giusti ⁽¹⁾⁽²⁾ , Marcelo Naiouf⁽¹⁾ , Santiago Medina, Diego Montezanti ⁽¹⁾ , Laura De Giusti⁽¹⁾⁽³⁾ ,
Fernando G. Tinetti ⁽¹⁾⁽³⁾ , Franco Chichizola⁽¹⁾ , Enzo Rucci⁽¹⁾⁽³⁾ , Adrián Pousa⁽¹⁾ , Victoria Sanz ⁽¹⁾⁽³⁾ ,
Diego Encinas ⁽¹⁾ , Ismael Rodríguez⁽¹⁾ , Sebastián Rodríguez Eguren⁽¹⁾ , Leandro Libutti⁽¹⁾ , Manuel
Costanzo ⁽¹⁾, Lucas Gómez D'Orazio⁽¹⁾, Francisco Garay⁽¹⁾

¹Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI),
Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata – Comisión de Investigaciones Científicas de la
Provincia de Buenos Aires

²CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³CICPBA – Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

{degiusti, mnaiouf, fernando, smedina, dmontezanti, ldgiusti, fernando, francoch, erucci, apousa, vsanz, dencinas,
ismael, seguren, llibutti, mcostanzo, lgomez, fgaray}@lidi.info.unlp.edu.ar

Resumen

El eje de esta línea de I/D lo constituye el estudio de la integración de arquitecturas distribuidas, que van desde el nivel de los nodos sensores basados en microcontroladores (Edge Computing), pasando por una capa intermedia de preprocesamiento (Fog Computing), hasta la capa final de procesamiento en la nube (Cloud Computing).

Los temas centrales de investigación son:

- La distribución equilibrada del procesamiento y del almacenamiento de datos en cada nivel.
- El análisis de la integridad y la performance de las comunicaciones, según el grado de distribución del procesamiento.
- La migración de un cierto nivel de inteligencia a los nodos finales, para reducir el consumo energético y los tiempos de comunicación.
- La integración y evaluación de servicios en las capas de Edge y Fog Computing.
- La incorporación y evaluación de estrategias de resiliencia y tolerancia a fallos a la arquitectura distribuida.
- La integración y evaluación de diversas plataformas IoT y servicios específicos.
- El desarrollo y evaluación del desempeño de aplicaciones que utilizan distintos niveles de procesamiento.
- La caracterización de los tiempos de cómputo y comunicaciones, así como de la

eficiencia energética, para aplicaciones en arquitecturas distribuidas

Palabras clave: *Sistemas Distribuidos. Cloud Computing. Fog Computing. Edge Computing. IoT, Procesamiento Distribuido. Eficiencia. Resiliencia*

Contexto

La línea de investigación que se presenta es parte del proyecto “Computación de Alto Desempeño: Arquitecturas, Algoritmos, Métricas de Rendimiento y Aplicaciones en HPC, Big Data, Robótica, Señales y Tiempo Real.” del III-LIDI y de proyectos específicos apoyados por organismos nacionales e internacionales. También es parte del proyecto “Procesamiento Eficiente de Grandes Datos mediante Cómputo de Altas Prestaciones, Fog y Edge” financiado por la Facultad de Informática de la UNLP y del proyecto “Unidad Inteligente para Control de Consumo Energético” financiado por la Secretaría de Políticas Universitarias y la UNLP.

En los temas relacionados existen cooperaciones con varias Universidades de Argentina, y se está trabajando con Universidades de América Latina y Europa en proyectos financiados por ERASMUS, CyTED y la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos). En particular, se colabora con el proyecto “Computación de Altas Prestaciones Eficiente y Segura para

Aplicaciones de Servicios de Salud Inteligentes”, de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Por otra parte, se cuenta con financiamiento de diferentes empresas de Argentina, en particular para la formación de recursos humanos en las temáticas de Cloud, Fog y Edge Computing.

Se participa en iniciativas como el Consorcio de I+D+I en Cloud Computing, Big Data y Emergent Topics, conformado por Universidades de Argentina y España.

Asimismo, el III-LIDI forma parte del Sistema Nacional de Cómputo de Alto Desempeño (SNCAD) del Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación.

Introducción

El constante aumento en la cantidad de datos a procesar que generan los múltiples sensores “inteligentes” en la actualidad, y la necesidad de acotar los tiempos de respuesta trae como consecuencia la necesidad de plantear nuevas arquitecturas que sean capaces de gestionar esa información.

La integración de capas de procesamiento y servicios, en lo que se denomina Edge y Fog Computing, ha dado lugar a un nuevo modelo de arquitectura denominado “Edge-Fog-Cloud Computing” [1] que busca generar una serie de ventajas:

- Reducir el tráfico de comunicaciones y los tiempos de respuesta, mediante la realización de cierto grado de procesamiento en los mismos nodos sensores o en una capa intermedia, y evitando así algunas comunicaciones con el Cloud.
- Obtener un cierto grado de resiliencia frente a fallos de comunicación o caídas de conexión.
- Lograr una cierta capacidad de adaptación de las instancias de procesamiento en función del contexto, incluyendo mayor procesamiento en los nodos sensores.

Este modelo de arquitectura trae nuevos desafíos [2], [3], [4], [5], como son:

- La administración de varios niveles de procesamiento y almacenamiento de datos heterogéneos, manteniendo sin embargo la integridad y seguridad del sistema.
- La definición de protocolos y mecanismos de interoperabilidad entre las diferentes capas de la arquitectura y los servicios en el Cloud.
- El desarrollo de estrategias para la tolerancia a fallos.
- El análisis de la distribución óptima de tareas en cada nivel, en función de mejorar los tiempos de respuesta.
- El análisis de estrategias para disminuir el consumo energético.
- La integración y la evaluación de diferentes plataformas, aplicaciones y servicios.
- El análisis de la escalabilidad con el aumento del número de sensores en la capa “Edge” (no lineal).

Cloud Computing

El cómputo en la nube (Cloud Computing), proporciona facilidad en el acceso y la utilización de grandes conjuntos de recursos físicos y lógicos (como pueden ser infraestructura, plataformas de desarrollo, almacenamiento y/o aplicaciones), por medio de una interfaz de administración web, con un modelo de arquitectura “virtualizada” [6] [7]. Estos recursos son proporcionados como servicios (“*as a service*”) y pueden ser dinámicamente reconfigurados para adaptarse a una carga de trabajo variable (escalabilidad), logrando una mejor utilización y evitando el sobre o sub dimensionamiento (elasticidad) [8].

En un modelo de procesamiento distribuido que integra desde los sensores hasta el cómputo en la nube, este último nivel se reserva para el procesamiento centralizado de algoritmos complejos, con gran volumen de datos. Parte de estos datos pueden haber sido pre-procesados en las capas inferiores de Edge o Fog [9] [10].

Fog Computing

El modelo de Fog Computing surge como respuesta al crecimiento de los desarrollos relacionados con Internet de las Cosas (IoT). Estos desarrollos requieren procesamiento en la nube, pero presentan características que hacen compleja su implementación mediante el uso exclusivo de tecnologías de Cloud Computing [11] [12]. Por lo tanto, Fog Computing consiste en una plataforma intermedia que provee capacidades de procesamiento, almacenamiento y servicios de comunicación en red entre los dispositivos Edge (que adquieren los datos en el modelo de IoT) y el Cloud. Las características de Fog Computing están orientadas al manejo de [13] [14] [15]:

- Aplicaciones distribuidas de tiempo real (y por lo tanto, bajas latencias).
- Gran número de nodos, que puede escalar dinámicamente.
- Heterogeneidad de los nodos.
- Movilidad de los nodos y conocimiento de su ubicación.
- Comunicaciones predominantemente inalámbricas.

Edge Computing

El modelo de Edge Computing está impuesto por el crecimiento exponencial del número de dispositivos sensores con inteligencia local disponibles. La Internet de las Cosas (IoT) está en continuo crecimiento: en la actualidad existen del orden de 50.000 millones de dispositivos conectados a Internet, con un tráfico del orden de 800 Zbytes. Por ello, se requiere capacidad de procesamiento cerca de los sensores, integración de datos locales y geográficamente distribuidos y posibilidad de preprocesar los mismos para enviarlos con una menor sobrecarga de comunicaciones a los niveles superiores (Fog o Cloud) [16] [17] [18] [19]. Las ventajas del modelo Edge son relativamente evidentes [20] [21]:

- Posibilidad de dar respuestas automáticas al usuario, en tiempo real, utilizando la capacidad local.
- Disminución del tráfico de datos.
- Mayor seguridad obtenida a través del procesamiento en servidores locales y privados.
- Posibilidad de disminuir el consumo energético, debido a las características de los componentes.
- Mejora de la eficiencia global para un sistema distribuido, débilmente acoplado.

Aplicaciones de tiempo real.

Este nuevo modelo Edge-Fog-Cloud Computing es especialmente aplicable a problemas de tiempo real (Cloud Robotics, vehículos autónomos, monitoreos de salud personalizados, etc.), al permitir que las capas cercanas a los sensores y al usuario resuelvan en menor tiempo (y con menor sobrecarga de comunicaciones), pudiendo dar una respuesta casi “inmediata” y dejando para el Cloud el procesamiento de los datos masivos *offline* (por ejemplo para ajustar/perfeccionar un modelo de comportamiento que luego se transforma en mejoras a los algoritmos en las capas Edge y Fog [22] [23]).

Eficiencia energética

La mejora de la eficiencia energética es un tema central en la informática actual, principalmente a partir de las plataformas con gran cantidad de procesadores. Muchos esfuerzos están orientados a tratar la eficiencia energética y a las metodologías para medirla como ejes de I/D, como una métrica de evaluación relevante. En el caso del modelo Edge-Fog-Cloud Computing, hay una mejora del consumo por dos efectos:

- Normalmente los procesadores que se emplean en la capa Edge son de bajo consumo.
- La reducción del tráfico de comunicaciones produce la disminución del consumo energético asociado al mismo.

Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación

- Arquitecturas aplicables en Edge Computing y en Fog Computing. Modelos de referencia.
- Administración e integración de recursos y datos en Edge y Fog Computing.
- Seguridad e integridad en los datos en Edge y Fog Computing.
- Vinculación de las capas Edge y Fog con el Cloud. Servicios requeridos.
- Vinculación de las capas Edge y Fog con plataformas dedicadas a IoT.
- Estrategias de distribución óptima de procesamiento y datos entre capas.
- Escalabilidad de las aplicaciones sobre Edge-Fog-Cloud.
- Migración de inteligencia al nivel Edge para reducir consumo y tiempos de comunicación.
- Métricas de eficiencia considerando tiempos de respuesta / costo de comunicaciones / consumo energético.
- Estrategias para incorporar resiliencia a las plataformas basadas en Edge, Fog y Cloud [24].
- Desarrollo de diferentes nodos finales: nodos sensores, robots, drones, etc.
- Algoritmos colaborativos en tiempo real que integren las capas de Edge, Fog y Cloud.
- Sistemas distribuidos inteligentes para controlar y reducir el consumo energético.
- Aplicaciones de las tecnologías de Cloud, Fog y Edge Computing a los procesos de Transformación Digital en organizaciones e industria.

Objetivos y Resultados Esperados

Investigación experimental por realizar

- Análisis comparativo de plataformas IoT y servicios específicos para su utilización a nivel de Edge y Fog.
- Planteo de arquitecturas que integren servicios y plataformas en las capas de Edge y Fog.

- Análisis de performance de protocolos de comunicación para la gestión de nodos utilizando plataformas IoT.
- Estudios de consumo energético en aplicaciones que utilizan los niveles de Edge, Fog y Cloud.
- Estudio comparativo para el balanceo de la carga de procesamiento en aplicaciones distribuidas que utilizan la arquitectura de 3 niveles.
- Integración de aplicaciones móviles.
- Análisis de estrategias para el control de fallos en las diferentes capas de la arquitectura.
- Aplicaciones: red de sensores para el monitoreo de CO2.
- Aplicaciones: sistema de nodos inteligentes para control del consumo energético en edificios.

Resultados obtenidos

- Se han analizado, desplegado y configurado diferentes servicios orientados a la gestión de nodos IoT.
- Se han realizado análisis comparativos de las características de Plataformas IoT desplegadas en diferentes arquitecturas.
- Se han realizado pruebas para el despliegue de sensores de CO2 comunicados a una Plataforma IoT [25].
- Se han estudiado protocolos de comunicación y volúmenes de tráfico en aplicaciones distribuidas en tiempo real
- Se ha desplegado un servidor a nivel de Edge (basado en una Raspberry Pi) para la gestión de nodos sensores y prueba de servicios específicos.
- Se han estudiado distintas estrategias de resiliencia aplicadas a una arquitectura distribuida basada en microservicios [26].

Organización de Eventos

En 2022 se han organizado las X Jornadas de Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics (JCC-BD&ET 2022) en Argentina, con participación de especialistas académicos del país y el exterior, además de empresas con experiencia en Cloud Computing [27] [28]. En junio de 2023 se tiene prevista la organización de las XI JCC-BD&ET.

Formación de Recursos Humanos

Dentro de la temática de la línea de I/D están en curso 3 Tesis de Maestría y 1 Trabajo Final Integrador de Especialización.

Asimismo, se presentó 1 trabajo final de grado y se están desarrollando otros 2 trabajos finales en temáticas relacionadas.

Además, se participa en el dictado de las carreras de Doctorado en Ciencias Informáticas, y Magíster y Especialización en Cómputo de Altas Prestaciones de la Facultad de Informática de la UNLP (acreditadas por CONEAU), por lo que potencialmente pueden generarse Tesis de Doctorado y Maestría, además de Trabajos Finales de Especialización.

Se está trabajando en la definición de una carrera de Maestría en Transformación Digital, en la que se dictarían los cursos relacionados con el empleo de Cloud, Fog y Edge Computing.

Existe cooperación con grupos de otras Universidades del país y del exterior con posibilidad de realizar Tesis en colaboración.

Respecto a las carreras de grado, se dictan por parte de integrantes de la línea de investigación dos asignaturas directamente relacionadas con los temas de ésta: “Cloud Computing y Cloud Robotics” y “Conceptos y Aplicaciones en Big Data”. Asimismo, todos los años se desarrollan proyectos con alumnos, relacionados básicamente con aplicaciones de tiempo real con robots y drones.

Referencias

[1] Mohan N., Kangasharju J. “Edge-Fog Cloud: A Distributed Cloud for Internet of Things Computations”, 2016 Cloudification of the Internet of Things (CIoT), Paris, France, 2016, pp. 1-6.
[2] P. Garcia Lopez et al. “Edge-centric computing: Vision and challenges,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 45, no. 5, pp. 37–42, Sep. 2015.
[3] M. Yannuzzi et al. “Key ingredients in an iot recipe: Fog computing, cloud computing, and more fog computing,” in *IEEE CAMAD*, 2014.
[4] K. Hong et al. “Mobile fog: A programming model for large-scale applications on the internet of things,” in *ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing*, 2013.
[5] A. Chandra, J. Weissman, and B. Heintz, “Decentralized edge clouds,” *Internet Computing, IEEE*, vol. 17, no. 5, pp. 70–73, Sept 2013.

[6] E. Rucci, M. Naiouf, F. Chichizola, and L. De Giusti “Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics. 8th Conference, JCC-BD&ET 2020, La Plata, Argentina, September 8-10, 2020, Proceedings”. Springer CCIS, ISBN: 978-3-030-61218-4, 2020.

[7] Xing, Y., Zhan, Y.: “Virtualization and Cloud Computing”. In: Proceedings pp.305-312, Springer Link. ISBN 978-3-642-27323-0. (2012). Morgan Kaufmann. 2013.

[8] Velte, A.T., Velte, T.J., Elsenpeter, R.: “Cloud Computing: A Practical Approach”. McGraw Hill Professional. 2009.

[9] Ashkan Yousefpour, Caleb Fung, Tam Nguyen, Krishna Kadiyala, Fatemeh Jalali, Amirreza Niakanlahiji, Jian Kong, Jason P. Jue. “All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey”, *Journal of Systems Architecture*, Volume 98, 2019, Pages 289-330, ISSN 1383-7621,

[10] Pi Puig M. et al. (2019) Intelligent Distributed System for Energy Efficient Control. In: Naiouf M., Chichizola F., Rucci E. (eds) *Cloud Computing and Big Data. JCC&BD 2019. Communications in Computer and Information Science*, vol 1050. Springer, Cham

An Overview on Edge Computing Research
[11] Keyan Cao, Yefan Liu, Gongjie Meng, Quimeng Sun “An Overview on Edge Computing Research” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 85714-85728, 2020.

[12] W. S. Shi, X. Z. Zhang, and Y. F. Wang, “Edge computing: State-of-the-art and future directions,” *J. Comput. Res. Develop.*, vol. 56, no. 1, pp. 1_21, 2019.

[13] X. Hong and Y. Wang, “Edge computing technology: Development and countermeasures,” *Chin. J. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 2, p. 20, 2018.

[14] D. Evans. “The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything”. Available:

<https://www.researchgate.net/publication/30612290>

[15] M. Satyanarayanan, “The emergence of edge computing,” *Computer*, vol. 50, no. 1, pp. 30_39, Jan. 2017.

[16] Y. Q. Gao, H. Bguan, and Z. W. Qi, “Service level agreement-based energy-Efficient resource man agreement in cloud data centers,” *Comput. Elect. Eng.*, vol. 40, no. 5, pp. 1621_1633, 2014.

[17] W. Shi, H. Sun, J. Cao, Q. Zhang, and W. Liu, “Edge computing-an emerging computing model for the Internet of everything era,” *J. Comput. Res. Develop.*, vol. 54, no. 5, pp. 907_924, May 2017.

[18] J. de Antueno, S. Medina, L. De Giusti and A. De Giusti, “Analysis, Deployment and Integration of Platforms for Fog Computing”, *Journal of Computer Science and Technology*, 20(2), e12, October 2020.

[19] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu and S. Addepalli, “Fog Computing and Its Role in the Internet of Things”, in *MCC '12: Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*.

Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 2012.

- [20] M. Asemani, F. Jabbari, F. Abdollahei and P. Bellavista, “A Comprehensive Fog-enabled Architecture for IoT Platforms”, *High-Performance Computing and Big Data Analysis. TopHPC 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 891. Springer, Cham*, 2019.
- [21] W. S. Aung and S. Aung Nyein Oo, “Monitoring and Controlling Device for Smart Greenhouse by using Thinger.io IoT Server”. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2019.
- [22] Dr. S. K. Selvaperumal, W. Al-Gumaei, R. Abdulla and V. Thiruchelvam, “Integrated Wireless Monitoring System Using LoRa and Node-Red for University Building”. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Volume 16, Number 8, American Scientific Publishers*, 2019.
- [23] M. Pi Puig, J. M. Paniago, S. Medina, S. Rodriguez Eguren, L. Libutti, J. Lanciotti, J. de Antueno, C. Estrebou, F. Chichizola and L. De Giusti, “Intelligent Distributed System for Energy Efficient Control”, *Cloud Computing and Big Data. JCC&BD 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1050. Springer, Cham*, 2019.
- [24] Medina, S., Montezanti, D. M., Gomez D'Orazio, L., Compagnucci, E., De Giusti, A. E., & Naiouf, M. (2022). Incorporating Resilience to Platforms based on Edge and Fog Computing. In X Jornadas de Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics (La Plata, 2022).
- [25] Gomez D'Orazio, L., Medina, S., Montezanti, D. “Integración de una red de sensores con una plataforma IoT para control inteligente de aulas”. Proceedings del XXVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2022) – EUDELAR, pp. 1002 – 1007. ISBN 978-987-1364-31-2 (2022). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/149102>.
- [26] Suarez, Sergio Leonel. “Análisis de patrones de resiliencia en una arquitectura basada en microservicios”. Tesina de Licenciatura en Sistemas. Universidad Nacional de La Plata. 2022. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/149187>
- [27] Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics: 9th Conference, JCC-BD&ET, La Plata, Argentina, June 22-25, 2021, Proceedings. Editores: M. Naiouf, E. Rucci, F. Chichizola, and A. De Giusti, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-030-84824-8, doi. 10.1007/978-3-030-84825-5, 2021.
- [28] A. E. De Giusti, M. Naiouf, L. C. De Giusti, E. Rucci, and F. Chichizola, “Short papers of the 9th Conference on Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics” Facultad de Informática (UNLP), ISBN: 978-950-34-2016-4, 2021