

















Procesamiento Distribuido: Cloud, Fog y Edge Computing.

Aplicaciones en Tiempo Real

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⁾ , Francisco Garay⁽¹⁾, Federico Walas Mateo⁽¹⁾⁽⁴⁾ 

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

⁴Universidad Nacional Arturo Jauretche

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

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 finales basados en sensores y microcontroladores, pasando por capas intermedias de almacenamiento y procesamiento (*Edge Computing* y *Fog Computing*), hasta la capa final de procesamiento en la nube (*Cloud Computing*).

Los temas centrales de investigación son:

- La planificación de la distribución del procesamiento y 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 búsqueda de la reducción de los tiempos de respuesta y el consumo energético, migrando un cierto nivel de inteligencia a los nodos finales.
- La evaluación de diferentes servicios y plataformas IoT para integrarse a las capas de *Edge* y *Fog Computing*.
- La incorporación de estrategias de resiliencia a la arquitectura distribuida y evaluación de su desempeño.
- La caracterización de los tiempos de cómputo y comunicaciones, así como de la eficiencia energética, para aplicaciones en arquitecturas distribuidas.
- El modelado de sistemas complejos de tiempo real y el desarrollo de software

inteligente para la toma de decisiones, que pueda ejecutarse en distintos niveles de procesamiento.

- El modelado y desarrollo de gemelos digitales para aplicaciones de tiempo real (industria de procesos / gestión sanitaria / área agrícola) buscando tener respuestas predictivas inteligentes.

Palabras clave: *Arquitecturas Distribuidas. Cloud Computing. Fog Computing. Edge Computing. IoT. Aplicaciones de Tiempo Real. Eficiencia Energética. Resiliencia. Gemelos Digitales.*

Contexto

La línea de investigación que se presenta forma parte del proyecto “Computación de Alto Desempeño y Distribuida: Arquitecturas, Algoritmos, Tecnologías y Aplicaciones en HPC, Fog-Edge-Cloud, Big Data, Robótica, y Tiempo Real” del III-LIDI y de proyectos específicos apoyados por organismos nacionales e internacionales.

En los temas relacionados, existen cooperaciones con diferentes universidades de Argentina, además de otras universidades de América Latina y Europa, en proyectos financiados por ERASMUS, CyTED y la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos). En particular, se realiza una colaboración con el proyecto “Computación de Altas Prestaciones Eficiente y Segura para

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

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

Además, desde la línea de investigación se participa una iniciativa denominada “Consorcio de I+D+I en *Cloud Computing*, *Big Data* y *Emergent Topics*”, conformado por diversas universidades de Argentina y España. Asimismo, se está trabajando en cooperación con la UAB (España), la UNNOBA y la UNAJ integrando proyectos específicos relacionados con las áreas de aplicación de Gemelos Digitales.

Por último, 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 que generan actualmente los múltiples nodos sensores inteligentes, y que deben ser procesados con tiempos de respuesta acotados, trae como consecuencia el requerimiento de arquitecturas que sean capaces de gestionar esa información.

La integración de nuevos niveles de procesamiento y servicios, denominadas *Edge* y *Fog Computing*, ha dado lugar a un nuevo modelo de arquitectura denominado “*Edge-Fog-Cloud Computing*” [1] que persigue los siguientes beneficios:

- Reducir el volumen de comunicaciones hacia el *Cloud*, así como los tiempos de respuesta, mediante la realización de parte del procesamiento en los mismos nodos sensores o en una capa intermedia.
- Obtener un cierto grado de resiliencia frente a fallos de comunicación o caídas de conexión, debido a la redundancia de componentes en los distintos niveles.

- Adaptar las instancias de procesamiento en función del contexto, mediante la posibilidad de trasladar mayor cantidad de procesamiento a los nodos sensores.

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

- La administración de los distintos niveles de procesamiento y almacenamiento de datos heterogéneos, manteniendo, a pesar de ello, la integridad y seguridad del sistema.
- La definición de protocolos y mecanismos de interoperabilidad entre las capas de la arquitectura y los servicios en la nube.
- El análisis e implementación de estrategias para la tolerancia a fallos.
- El análisis de la distribución óptima de tareas en cada nivel, con el objetivo de reducir los tiempos de respuesta.
- El análisis de estrategias para disminuir el consumo energético.
- La integración de diferentes plataformas, aplicaciones y servicios, y la comparación entre ellos.
- El análisis de la escalabilidad con el aumento del número de nodos sensores y dispositivos finales.

Cloud Computing

El cómputo en la nube (*Cloud Computing*), simplifica el acceso y la utilización de grandes conjuntos de recursos físicos y lógicos (como 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 se brindan como servicios (“*as a service*”) y pueden ser dinámicamente reconfigurados para adaptarse a una carga de trabajo variable (escalabilidad), logrando una mejor utilización y elasticidad [8].

En un modelo de procesamiento distribuido, que integra desde nodos sensores hasta el cómputo en la nube, este último nivel se reserva para el procesamiento centralizado de algoritmos complejos que manejan grandes volúmenes de datos. Sin embargo, 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 e implementaciones de IoT. Si bien estos desarrollos requieren procesamiento en la nube, presentan características que hacen compleja su implementación usando exclusivamente tecnologías de *Cloud Computing* [10-12]. Entonces, la capa de *Fog* está conformada por una plataforma intermedia en la que se ponen a disposición capacidad de cómputo, almacenamiento y servicios de comunicación entre los dispositivos *Edge* (conectados a los *End Devices* que adquieren los datos) y el *Cloud*.

Las características de *Fog Computing* [13-15] están orientadas al manejo de:

- 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, con necesidad de conocer su ubicación, con comunicaciones predominantemente inalámbricas.

Edge Computing

La necesidad de un modelo de *Edge Computing* es consecuencia del crecimiento exponencial de la cantidad de dispositivos sensores disponibles con inteligencia local. La 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 realizar procesamiento cerca de los sensores, para integrar datos locales y geográficamente distribuidos, y tener la posibilidad de preprocesarlos para luego enviarlos con menor sobrecarga de comunicaciones a los niveles superiores (*Fog* o *Cloud*) [16-19]. Las ventajas del modelo *Edge* son relativamente evidentes [10] [20] [21]:

- Posibilidad de responder automáticamente al usuario, en tiempo real, utilizando capacidades de procesamiento locales.
- Reducción del volumen de datos que se transmiten.
- Mayor seguridad, obtenida a través de conexiones con servidores locales y privados para procesamiento.
- 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.

El modelo *Edge-Fog-Cloud Computing* es especialmente aplicable a problemas de tiempo real (*Cloud Robotics*, vehículos autónomos, la emergencias sanitarias, los monitoreos de salud personalizados, etc.), al permitir que las capas cercanas a los sensores y al usuario resuelvan parte del procesamiento en menor tiempo (y con menor volumen de comunicaciones), pudiendo responder casi “inmediatamente” y dejando para el *Cloud* el procesamiento de los datos masivos *offline* (por ejemplo, un algoritmo sofisticado entrenar un modelo de comportamiento que luego se traduce en mejoras al procesamiento de en las capas *Edge* y *Fog* [22] [23]).

En particular, resultan interesantes el modelado de sistemas complejos, tales como los de la industria de procesos, la industria agrícola y la gestión sanitaria de emergencias, en los que resulta necesario recoger datos de sensores en tiempo real y analizar (o desarrollar) software inteligente para la toma de decisiones.

Eficiencia energética

Actualmente, la mejora de la eficiencia energética es un tema central en la informática, principalmente a partir del surgimiento de plataformas con gran cantidad de procesadores. Muchos esfuerzos están orientados a tratar la eficiencia energética y las metodologías de medición como métricas de evaluación relevantes [23]. El modelo *Edge-*

Fog-Cloud presenta mejoras en el consumo por dos efectos:

- Los procesadores que se emplean en la capa *Edge* son habitualmente de bajo consumo.
- La disminución de las comunicaciones produce la disminución del consumo energético asociado a ellas.

Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación

- Modelos de arquitecturas aplicables para *Edge* y *Fog Computing*.
- 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* utilizando plataformas dedicadas a IoT y servicios específicos.
- Estrategias de distribución óptima de procesamiento y datos entre capas.
- Escalabilidad de las aplicaciones sobre *Edge-Fog-Cloud*.
- Migración de inteligencia al nivel *Edge* y a los nodos sensores para reducir consumo y tiempos de respuesta.
- Medición de métricas de eficiencia considerando tiempos de respuesta / costo de comunicaciones / consumo energético.
- Definición de estrategias para incorporar resiliencia y control del consumo energético a las plataformas basadas en *Edge, Fog* y *Cloud* [18] [24].
- Desarrollo de diferentes dispositivos finales: nodos sensores, robots, drones, etc.
- Implementación y despliegue de aplicaciones de tiempo real en las tecnologías de *Cloud, Fog* y *Edge Computing* para controlar los procesos de Transformación Digital en la industria y las organizaciones [25] [26].
- Gemelos digitales y sus aplicaciones actuales (industria y sistemas inteligentes de tiempo real).
- Incorporación de Inteligencia a sistemas de Gemelos Digitales.

Objetivos y Resultados Esperados

Investigación experimental por realizar

- Análisis comparativo de plataformas IoT y servicios específicos para ser integrados con los niveles de *Edge* y *Fog*.
- Implementación de diferentes escenarios de arquitecturas distribuidas con servicios y plataformas integrados a las capas de *Edge* y *Fog*, optimizados para cada caso de estudio particular.
- Evaluación de diversos protocolos de comunicación para la gestión de nodos de IoT.
- Análisis e implementación de estrategias de resiliencia [18] y control de consumo energético en aplicaciones que utilizan los niveles de *Edge, Fog* y *Cloud*.
- Investigación de estrategias de balance de carga de procesamiento en aplicaciones que utilizan la arquitectura distribuida.
- Aplicación: red de nodos sensores inteligentes para monitoreo y control de parámetros en edificios universitarios.
- Aplicación: exploración y mapeo de ambientes mediante nodos finales constituidos por robots, monitoreados por dispositivos en la capa *Edge*.

Resultados obtenidos

- Se han integrado diferentes servicios orientados a la gestión de nodos IoT.
- Se han realizado diferentes despliegues de Plataformas IoT.
- Se ha desplegado una red de sensores de CO2 comunicados a una plataforma IoT a nivel de *Fog* [27].
- Se han estudiado protocolos de comunicación, volúmenes de tráfico y tiempos de respuesta en aplicaciones distribuidas en tiempo real.
- Se ha desplegado un nodo *Edge* (basado en una Raspberry Pi) para la gestión de sensores, dispositivos finales y prueba de servicios específicos.
- Se ha desarrollado un nodo sensor basado en un robot con cámara y sensores, conectado a un nodo *Edge* para diversas aplicaciones distribuidas.

- Se han implementado diversas estrategias de resiliencia sobre una arquitectura distribuida basada en microservicios [28].
- Se ha definido un proyecto de estadía Postdoctoral en el III-LIDI vinculado con Gemelos Digitales y su aplicación en la industria de procesos [29].

Organización de Eventos

En 2023 se han organizado las XI Jornadas de *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics* (JCC-BD&ET 2023) en Argentina, con participación de especialistas académicos del país y el exterior, además de empresas con experiencia en *Cloud Computing*. En junio de 2024 se tiene prevista la organización de las XII JCC-BD&ET.

Formación de Recursos Humanos

Dentro de la temática de la línea de I/D están en curso 2 Tesis de Doctorado y 1 Trabajo Final Integrador de Especialización.

Además, se están llevando a cabo 2 trabajos finales de grado y 2 practicas profesionales supervisadas.

Asimismo, se finalizó 1 Tesis de Maestría, y 1 trabajo final de grado.

Fue aprobada por la Facultad de Informática de la UNLP una estadía Postdoctoral con el título “Automatización en la Industria X.0. Aplicación de Gemelos Digitales en industria de Procesos” que será dirigida por integrantes de la línea de investigación con colaboración de docentes de la Universidad Autónoma de Barcelona, como una continuidad del trabajo realizado en [27].

Varios integrantes de la línea de investigación participan en el dictado de las carreras de Doctorado en Ciencias Informáticas, Magíster y Especialización en Cómputo de Altas Prestaciones y el Magíster en Gestión y Tecnología de Ciudades Inteligentes 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 dictaron dos cursos de postgrado: “Conceptos de *Cloud, Fog y Edge*

Computing” y “Gobernanza y Gestión de Tecnologías de la Información”.

Además, algunos integrantes de esta línea de investigación dirigieron y participaron del proyecto “Procesamiento Eficiente de Grandes Datos mediante Cómputo de Altas Prestaciones, *Fog y Edge*”, financiado por la Facultad de Informática de la UNLP.

Se está avanzando en la definición de una carrera de Maestría en Transformación Digital, en la que se requeriría del dictado de 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 con aplicaciones de tiempo real con redes de sensores, 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] P. Lea, "IoT and Edge Computing for Architects: Implementing edge and IoT systems from sensors to clouds with communication systems, analytics, and security". Packt Publishing, 2020.
- [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] Medina, S., Montezanti, D., Gómez D'Orazio, L., Garay, F., De Giusti, A., & Naiouf, M. (2023, June). Distributed Architectures Based on Edge Computing, Fog Computing and End Devices: A Conceptual Review Incorporating Resilience Aspects. In *Conference on Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics* (pp. 31-44). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [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 Thingier.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] F. Walas, A. Redchuk, J. Tornillo. "Gestión de datos de la operación en la industria a través de plataformas IIoT. Experiencia en una empresa del sector alimentos en Argentina"
- [26] Borek, A., Prill, N. "Driving Digital Transformation through Data and AI: A Practical Guide to Delivering Data Science and Machine Learning Products." Kogan Press, 2023.
- [27] 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>.
- [28] 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>
- [29] Federico Walas (2023) Tesis Doctoral. "Nuevos modelos de negocio en el paradigma Industria 5.0. Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para optimizar procesos industriales"