

## Tendencias en Arquitecturas y Algoritmos para Sistemas Paralelos y Distribuidos

Marcelo Naiouf<sup>(1)</sup>, Franco Chichizola<sup>(1)</sup>, Laura De Giusti<sup>(1)(3)</sup>, Enzo Rucci<sup>(1)(2)</sup>, Adrián Pousa<sup>(1)</sup>, Ismael Rodríguez<sup>(1)</sup>, Sebastián Rodríguez Eguren<sup>(1)</sup>, Erica Montes de Oca<sup>(1)</sup>, Juan Manuel Paniego<sup>(1)</sup>, Martín Pi Puig<sup>(1)</sup>, Leandro Libutti<sup>(1)</sup>, Javier Balladini<sup>(4)</sup>, Armando De Giusti<sup>(1)(2)</sup>

<sup>1</sup>Instituto 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

<sup>2</sup>CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup>CICPBA – Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

<sup>4</sup>Universidad Nacional del Comahue

{mnaiouf,francoch,ldgiusti,erucci,apousa,ismael,seguren,emontesdeoca,jmpaniego,mpipuig, libutti,  
degiusti}@lidi.info.unlp.edu.ar; javier.balladini@gmail.com

### Resumen

El eje de esta línea de I/D lo constituye el estudio de tendencias actuales en las áreas de arquitecturas y algoritmos paralelos. Incluye como temas centrales:

- Arquitecturas many-core (GPU, procesadores MIC), FPGAs, híbridas (diferentes combinaciones de multicores y aceleradores), y asimétricas.
- Cloud Computing para HPC (especialmente para aplicaciones de Big Data) y sistemas distribuidos de tiempo real (Cloud Robotics).
- Desarrollo y evaluación de algoritmos paralelos sobre nuevas arquitecturas y su evaluación de rendimiento energético y computacional.

**Palabras clave:** *Sistemas Paralelos. Clusters. Arquitecturas asimétricas. GPU, MIC, FPGA. Cloud Computing. Cloud robotics. Performance y eficiencia energética.*

### Contexto

Se presenta una línea de Investigación que es parte del proyecto del III-LIDI “Computación de Alto Desempeño: Arquitecturas, Algoritmos, Métricas de rendimiento y Aplicaciones en HPC, Big Data, Robótica, Señales y Tiempo Real” (en el marco del Programa de Incentivos del Ministerio de Educación) y de proyectos específicos apoyados por organismos

nacionales e internacionales. También del proyecto “Transformación de algoritmos para nuevas arquitecturas multiprocesador” financiado por la Facultad de Informática de la UNLP.

En el tema hay cooperación con varias Universidades de Argentina y se está trabajando con Universidades de América Latina y Europa en proyectos financiados por CyTED, AECID y la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos).

Por otra parte, se tiene financiamiento de Telefónica de Argentina en Becas de grado y posgrado y se ha tenido el apoyo de diferentes empresas (IBM, Microsoft, Telecom, Intel) en la temática de Cloud Computing.

Se participa en iniciativas como el Programa IberoTIC de intercambio de Profesores y Alumnos de Doctorado en el área de Informática.

Asimismo, el III-LIDI forma parte del Sistema Nacional de Cómputo de Alto Desempeño (SNCAD) del MinCyT.

### Introducción

Una de las áreas de creciente interés lo constituye el cómputo de altas prestaciones, en el cual el rendimiento está relacionado con dos aspectos: por un lado las arquitecturas de soporte y por el otro los algoritmos que hacen uso de las mismas.

A la aparición de arquitecturas *many-core* (como las GPU o los procesadores MIC), se

ha sumado el uso de FPGAs debido a su potencia de cómputo y rendimiento energético. Su combinación en sistemas HPC da lugar a plataformas híbridas con diferentes características [RUC16].

Lógicamente, esto trae aparejado una revisión de los conceptos del diseño de algoritmos paralelos (incluyendo los lenguajes mismos de programación y el software de base), así como la evaluación de las soluciones que éstos implementan. También resulta necesario investigar las estrategias de distribución de datos y procesos a fin de optimizar la performance.

Además, el estudio del consumo y la eficiencia energética de los nuevos sistemas paralelos se vuelve tan importante como el de métricas clásicas (speedup, eficiencia, escalabilidad) debido a los costos económicos y los problemas operativos asociados [BAL13].

Por otra parte, los avances en las tecnologías de virtualización y cómputo distribuido han dado origen al paradigma de Cloud Computing, que se presenta como una alternativa a los tradicionales sistemas de Clusters y Multicluster para ambientes de HPC [BER08]. A su vez, este concepto se puede ampliar a sistemas distribuidos de tiempo real, en particular sistemas inteligentes como son los robots que pueden trabajar en paralelo utilizando su propia capacidad de procesamiento y al mismo tiempo conectándose con la potencia de un servidor en la nube (*Cloud Robotics*) [LOR13][GUO12][KEH15].

En esta línea de I/D se trabaja sobre aspectos que marcan tendencias en el área.

### GPUs y Cluster de GPUs

Las GPUs son el acelerador dominante en la comunidad de HPC al día de hoy por su alto rendimiento y bajo costo de adquisición. En la actualidad, tanto NVIDIA como AMD trabajan especialmente en mejorar la eficiencia energética de sus placas y disminuir el alto costo de programación.

La combinación de GPUs con otras plataformas paralelas como clusters y multicores, brindan un vasto conjunto de

posibilidades de investigación en arquitecturas híbridas, a partir de diferentes combinaciones a saber:

- Máquinas multicore con más de una GPU, que combinan herramientas de programación paralela como OpenMP/CUDA o Pthread/CUDA.
- Cluster de máquinas multicore cada una con una o más placas de GPU, lo que permite combinar OpenMP/MPI/CUDA o Pthread/MPI/CUDA.

Los desafíos que se plantean son múltiples, sobre todo en lo referido a distribución de datos y procesos en tales arquitecturas híbridas a fin de optimizar el rendimiento de las soluciones.

### MIC

En forma reciente Intel brinda una alternativa a partir de la arquitectura MIC (*Many Integrated Core Architecture*). Esta arquitectura permite utilizar métodos y herramientas estándar de programación con altas prestaciones (lo que los distingue especialmente de las GPUs). De esta forma, se remueven barreras de entrenamiento y se permite focalizar en el problema más que en la ingeniería del software. Xeon Phi es el nombre elegido por Intel para su serie de procesadores many-core. Recientemente, Intel ha lanzado Knights Landing (KNL), la segunda generación de Xeon Phi. A diferencia de sus predecesores que operaban como co-procesador a través del puerto PCI, los procesadores KNL pueden operar en forma autónoma. Además, integran las nuevas extensiones vectoriales AVX-512 y tecnología de memoria 3D, entre otras características avanzadas [REI16].

### FPGAs

Una FPGA (*Field Programmable Gate Array*) es una clase de acelerador basado en circuitos integrados reconfigurables. La capacidad de adaptar sus instrucciones de acuerdo a la aplicación objetivo le permite incrementar la productividad de un sistema y mejorar el rendimiento energético para ciertos tipos de aplicaciones. Tradicionalmente fueron utilizadas para el procesamiento digital de

señales. Sin embargo, en los últimos años, existen dos tendencias claras para extender su uso a otros dominios. En primer lugar, el establecimiento de alianzas estratégicas entre fabricantes de procesadores y de FPGAs para integrar estos dispositivos en arquitecturas híbridas (Intel con Altera; IBM con Xilinx) [IBM15][INT16]. En segundo lugar, el desarrollo de nuevas herramientas de programación para FPGAs empleando estándares familiares para HPC, con las cuales se espera reducir los tradicionales tiempos y costos de programación [SEA13][XIL15]. Por último, la incorporación de FPGAs a los servicios de cloud abre nuevas oportunidades para la explotación de esta clase de aceleradores.

### **Eficiencia energética**

La mejora de la eficiencia energética es una de las principales preocupaciones en la informática actual, principalmente a partir de las plataformas con gran cantidad de procesadores. Muchos esfuerzos están orientados a tratar la eficiencia energética como eje de I/D, como métrica de evaluación, y también a la necesidad de metodologías para medirla.

Entre los puntos de interés pueden mencionarse:

- Análisis de metodologías y herramientas para medir consumo energético.
- Estudio de técnicas para reducir el consumo energético en aplicaciones de HPC de acuerdo a las arquitecturas utilizadas.
- Evaluación de eficiencia energética de diferentes algoritmos y plataformas paralelas.
- Optimización de la eficiencia energética. A partir de los valores de energía que brindan los contadores hardware es posible definir estrategias de programación que lleven a reducir el consumo, manteniendo a su vez el rendimiento en valores aceptables [SAE17].

### **Cloud Computing**

Cloud Computing, proporciona grandes conjuntos de recursos físicos y lógicos (como pueden ser infraestructura, plataformas de desarrollo, almacenamiento y/o aplicaciones), fácilmente accesibles y utilizables por medio

de una interfaz de administración web, con un modelo de arquitectura “virtualizada” [SHA10][XIN12]. 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) [VEL09].

Más allá de las potenciales características y beneficios que brinda un Cloud, de por sí atractivas, es de gran interés estudiar el despliegue de entornos de ejecución para cómputo paralelo y distribuido (Clusters Virtuales), como así también realizar I/D en la portabilidad de las aplicaciones de HPC en el Cloud [DOE11][ROD11].

Por otro lado, Cloud Robotics es una de las áreas más prometedoras de la investigación informática actual en la cual se cuenta con “robots” dotados de diferentes sensores y capacidades, conectados a un Cloud vía Internet. Los temas de investigación derivados son múltiples: sensores, redes de sensores e inteligencia distribuida; robótica y sistemas colaborativos de tiempo real basados en robots; aplicaciones críticas (por ej. en ciudades inteligentes o en el ámbito industrial).

### **Dispositivos de bajo costo con capacidades para cómputo paralelo**

En la actualidad se comercializan placas de bajo costo como Raspberry PI [RAS17] u Odroid [ODR17] que poseen múltiples núcleos simples. Asimismo, existen diversos dispositivos móviles con capacidades similares. Es de interés estudiar como explotar el paralelismo en estos dispositivos para mejorar el rendimiento y/o consumo energético de las aplicaciones.

### **Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación**

- Arquitecturas many-core (procesadores MIC y GPU) y FPGA. Análisis de este tipo de máquinas y de técnicas para desarrollar código optimizado.

- Arquitecturas híbridas (diferentes combinaciones de clusters, multicores, manycores y FPGAs). Diseño de algoritmos paralelos sobre las mismas.
- Exploración de nuevos lenguajes y modelos de programación para HPC.
- Cloud Computing para realizar HPC. Evaluación de performance en este tipo de arquitectura. Análisis del overhead por el software de administración del Cloud.
- Sistemas inteligentes de tiempo real distribuidos (Cloud Robotics).
- Interconexión de Brokers de mensajes MQTT sobre Cloud Públicos y Cloud Privados.
- Consumo energético en las diferentes arquitecturas paralelas, en particular en relación a los algoritmos paralelos y la configuración de la arquitectura. Análisis de metodologías y herramientas de medición.

## Resultados y Objetivos

### Investigación experimental a realizar

- Desarrollo y evaluación de algoritmos paralelos sobre nuevas arquitecturas. Análisis de rendimiento, eficiencia energética y costo de programación.
- Análisis del overhead introducido por el sistema gestor del Cloud en un entorno de HPC para aplicaciones científicas de Big Data. Comparar el rendimiento entre Cloud y Cluster Computing.
- Analizar y comparar las diferentes estrategias para interconectar brokers de mensajes MQTT tanto sobre cloud públicos como privados.
- Realizar el desarrollo de nuevos planificadores de tareas para multicores asimétricos sobre diferentes sistemas operativos con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar el consumo de energía [SAE15][SAE17].
- Optimización de algoritmos paralelos para controlar el comportamiento de múltiples robots que trabajan colaborativamente, considerando la distribución de su capacidad de procesamiento “local” y la coordinación con la potencia de cómputo y capacidad de

almacenamiento (datos y conocimiento) de un Cloud.

### Resultados obtenidos

- Se ha finalizado una tesis de doctorado en la línea de planificación de procesos sobre multicores asimétricos (AMPs). Se analizó la relación entre rendimiento, justicia y eficiencia energética al ejecutar varias cargas de trabajo diversas sobre AMPs. El análisis permitió el diseño de nuevas estrategias de planificación, implementadas sobre sistemas operativos de propósito general, orientadas a optimizar estos objetivos [POU17].
- Se estudiaron técnicas de programación y optimización para la nueva generación de procesadores Xeon Phi (*Knights Landing*) [RUC18].
- Se cuantificaron las mejoras introducidas por el uso de GPUs para aplicaciones de procesamiento digital de imágenes tanto desde el punto de vista del desempeño como del consumo energético [PIP17].
- Se evaluó el uso de diferentes arquitecturas paralelas (CPU, Xeon Phi, GPU, FPGA) para procesamiento de grandes conjuntos de datos biológicos considerando no sólo el rendimiento sino la eficiencia energética [RUC17a][RUC17b].
- Se analizó la precisión en la predicción del consumo de energía por parte de la herramienta Intel RAPL [PAN18].
- Análisis del despliegue de un sistema multi-robot, integrado por un chasis de auto Rover de 4 ruedas y un cuadricóptero Parrot Bebop, conectados a un servicio de cloud público [DEG17].

### Organización de Eventos

En el año 2017 se han organizado las V Jornadas de Cloud Computing y Big Data (JCC&BD 2017) en Argentina, con participación de especialistas académicos del país y del exterior y de empresas con experiencia en Cloud Computing. En junio de 2018 se organizarán las VI Jornadas de Cloud Computing y Big Data (JCC&BD 2018).

## Formación de Recursos Humanos

Dentro de la temática de la línea de I/D el último año se concluyeron: 1 tesis doctoral, 1 tesis de maestría y 1 trabajo de Especialización. Al mismo tiempo se encuentran en curso 2 tesis de Doctorado en Ciencias Informáticas y 2 tesis de Maestría.

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 la CONEAU con categoría A, B y A, respectivamente), por lo que potencialmente pueden generarse nuevas Tesis de Doctorado y Maestría y Trabajos Finales de Especialización.

Existe cooperación con grupos de otras Universidades del país y del exterior, y hay tesis de diferentes Universidades realizando su Tesis con el equipo del proyecto.

Respecto a las carreras de grado, se dictan por parte de integrantes de la línea de investigación tres materias directamente relacionadas con los temas de la misma: “Taller de Programación sobre GPUs”, “Cloud Computing y Cloud Robotics” y “Conceptos y Aplicaciones en Big Data”.

## Referencias

[BAL13] Ballardini, J., Rucci, E., De Giusti, A., Naiouf, M., Suppi, R., Rexachs, D., Luque, E. “Power characterisation of shared-memory HPC systems”. *Computer Science & Technology Series – XVIII Argentine Congress of Computer Science Selected Papers*. ISBN 978-987-1985-20-3. Págs. 53-65. 2013.

[BER08] Bertogna, M., Grosclaude, E., Naiouf, M., De Giusti, A., Luque, E.: “Dynamic on Demand Virtual Clusters in Grids”. In: 3rd Workshop on Virtualization in High-Performance Cluster and Grid Computing (VHPC 08). España. (2008).

[BOR05] S. Y. Borkar, P. Dubey, K. C. Kahn, D. J. Kuck, H. Mulder, S. S. Pawlowski, y J. R. Rattner: “Platform 2015: Intel® Processor and Platform Evolution for the Next Decade”. In: Intel Corporation, White Paper, 2005.

[DEG17] A. E. De Giusti, I. P. Rodriguez, M. Costanzo, and M. Boggia. “Cloud robotics: Auto Rover 4wd y cuadricóptero controlados remotamente desde AWS”. *Actas del XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2017)*., ISBN: 978-950-34-1539-9, págs. 165-174, octubre de 2017.

[DOE11] Doelitzcher, F., Held, M., Sulistio, A., Reich, C. ViteraaS: “Virtual Cluster as a Service”. In: 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science. Grecia (2011).

[GUO12] Guoqiang Hu, Wee Peng Tay, Yonggang Wen: “Cloud robotics: architecture, challenges and applications”. In: *Network, IEEE*, vol.26, no.3, pp.21-28. 2012.

[IBM15] IBM. “IBM and Xilinx Announce Strategic Collaboration to Accelerate Data Center Applications”. Disponible en <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/48074.wss>

[INT16] Intel. “Intel Acquisition of Altera”. Disponible en <http://intelacquiresaltera.transactionannouncement.com>

[KEH15] Kehoe B., Patil S., Abbeel P., Goldberg K.: “A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation”. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (T-ASE): Special Issue on Cloud Robotics and Automation*. Vol. 12, no. 2. 2015.

[LOR13] Lorencik D., Sincak P.: “Cloud robotics: Current trends and possible use as a service”. In: *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, 2013 IEEE 11th International Symposium on , vol., no., pp.85-88. 2013.

[ODR16] Odroid <http://www.hardkernel.com> Accedido 21 de Marzo de 2016.

[PAN18] J. M. Paniego, S. Gallo, M. P. Puig, F. Chichizola, L. D. Giusti, and J. Ballardini. “Analysis of RAPL Energy Prediction Accuracy in a Matrix Multiplication Application on Shared Memory”. En: *Computer Science – CACIC 2017. Communications in Computer and Information Science*, vol 790, ISBN: 978-3-319-75213-6 978-3-319-75214-3, Springer, Cham, págs. 37-46, enero de 2018.

[PIP17] M. Pi Puig, L. C. De Giusti, M. Naiouf, and A. E. De Giusti. “GPU Performance and Power Consumption Analysis: A DCT based denoising application” *Actas del XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2017)*., ISBN: 978-950-34-1539-9, págs. 185-195, octubre de 2017.

[POU17] Pousa Adrian, De Giusti Armando, Saez Alcaide Juan Carlos. Tesis de Doctorado: “Optimización de rendimiento, justicia y consumo energético en sistemas multicore asimétricos mediante planificación” <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62960>

[RAS16] Raspberry PI. <https://www.raspberrypi.org/> Accedido 21 de Marzo de 2016.

[REI16] Reinders, J., Jeffers, J., Sodani, A. “Intel Xeon Phi Processor High Performance Programming Knights Landing Edition”. Morgan Kaufmann Publishers Inc., Boston, MA, USA, 2016

[ROD11] Rodriguez, I., Pettoruti, J.E., Chichizola, F., De Giusti, A.: “Despliegue de un Cloud Privado para entornos de cómputo científico”. In: *Proceedings del XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*. Argentina (2011).

[RUC16] Rucci, Enzo: “Evaluación de rendimiento y eficiencia energética en sistemas heterogéneos para

- bioinformática”. Tesis de Doctorado en Ciencias Informáticas (Facultad de Informática – UNLP). 2016.
- [RUC17a] E. Rucci, C. Garcia, G. Botella, A. De Giusti, M. Naiouf, and M. Prieto-Matias. “Accelerating Smith-Waterman Alignment of Long DNA Sequences with OpenCL on FPGA”. En: *Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10209., ISBN: 978-3-319-56154-7, Springer, Cham, págs. 500-511, 2017.
- [RUC17b] E. Rucci, C. Garcia, G. Botella, A. De Giusti, M. Naiouf, and M. Prieto-Matias. “First Experiences Accelerating Smith-Waterman on Intel’s Knights Landing Processor”. En: *Algorithms and Architectures for Parallel Processing. ICA3pp 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10393, ISBN: 978-3-319-65482-9, Springer International Publishing, págs. 569-579, 2017.
- [RUC18] “Blocked All-Pairs Shortest Paths Algorithm on Intel Xeon Phi KNL Processor: A Case Study”. E. Rucci, A. De Giusti, and M. Naiouf, En: *Computer Science – CACIC 2017. Communications in Computer and Information Science*, vol 790, ISBN: 978-3-319-75213-6 978-3-319-75214-3, Springer, Cham, págs. 47-57, 2018.
- [SAE15] Juan Carlos Saez, Adrian Pousa, Daniel Chaver, Fernando Castro, Manuel Prieto Matias: “ACFS: A Completely Fair Scheduler for Asymmetric Single-ISA Multicore Systems”. In: *ACM SAC 2015 (The 30TH ACM/SIGAPP Symposium on applied computing)*. 2015.
- [SAE17] Saez, J.C., Pousa, A., Rodríguez-Rodríguez, R., Castro, F., Prieto-Matias, M. “PMCTrack: Delivering performance monitoring counter support to the OS scheduler”. *The computer journal* Volume 60, Issue 1 January 2017.
- [SEA13] Sean Settle: “High-performance Dynamic Programming on FPGAs with OpenCL”. In: *IEEE High Performance Extreme Computing Conference*. 2013.
- [SHA10] Shafer, J.: “I/O virtualization bottlenecks in cloud computing today”. In: *Proceedings of the 2nd conference on I/O virtualization (VIOV10)*. USA (2010).
- [VEL09] Velte, A.T., Velte, T.J., Elsenpeter, R.: “Cloud Computing: A Practical Approach”. McGraw Hill Professional. 2009.
- [XIL15] Xilinx Inc. “SDAccel Development Environment”. [Online]. Disponible en <http://www.xilinx.com/products/design-tools/software-zone/sdaccel.html>
- [XIN12] 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.