

Aspectos energéticos de sistemas de computación

Javier Balladini, Belén Casanova, Marina Morán, Federico Uribe, Armando De Giusti¹

Facultad de Informática, Universidad Nacional del Comahue

Buenos Aires 1400, Neuquén Capital, Tel. 0299 - 4490300

{javier.balladini, mb.casanova.retamal, fede.uribe83}@gmail.com

¹ Instituto de Investigación en Informática LIDI, Universidad Nacional de La Plata

50 y 120 - 2do Piso, La Plata, Tel/Fax (54-221) 4227707

degjusti@lidi.info.unlp.edu.ar

Resumen

En los últimos años, las métricas de potencia y consumo energético han dirigido el diseño del hardware de la computación, incluyendo CPUs multi-core y aceleradoras como por ejemplo las GPUs. El diseño con consciencia de la potencia y energía también ha dominado las grandes instalaciones de supercomputadoras y sistemas de cloud computing. La alta demanda energética tiene serias consecuencias financieras, medioambientales, y en muchos casos también sociales. Además de cambiar el diseño tradicional del hardware, enfocado exclusivamente a aumentar la velocidad de procesamiento, es necesario desarrollar software para gestionar los recursos hardware y permitir adaptarse a determinados niveles de potencia y consumo energético.

Esta situación nos ha motivado a realizar una colaboración entre tres universidades para estudiar diferentes temas relacionados a la computación ecológica. Nuestro trabajo se centra en el diseño del software y no del hardware. Las líneas de interés actuales son: caracterización energética, predicción de potencia, diseño de algoritmos de escalado dinámico de frecuencia y tensión, y estrategias energéticas en cloud computing.

Palabras claves: computación ecológica, eficiencia energética, computación de altas prestaciones

1. Contexto

La investigación aquí presentada surge como una colaboración entre la Facultad de Informática de la Universidad Nacional del Comahue, el Instituto de Investigación en Informática LIDI de la Universidad Nacional de La Plata, y el grupo de investigación HPC4EAS (High Performance Computing for Efficient Applications and Si-

mulation) de la Universidad Autónoma de Barcelona (España). La colaboración se centra en el estudio del consumo energético de los sistemas de cómputo paralelo al ejecutar aplicaciones científicas computacionalmente complejas.

2. Introducción

De acuerdo con la definición de San Murugesan [9], se define el campo de la computación ecológica como el estudio y práctica del diseño, fabricación, uso y disposición de las computadoras, servidores y subsistemas relacionados como monitores, impresoras, almacenamiento y sistemas de redes y comunicación eficientes y efectivos con un impacto mínimo o nulo en el ambiente. El autor identifica cuatro formas en las cuales cree que los efectos de las computadoras en el ambiente deberían ser considerados: diseño ecológico, fabricación ecológica, uso ecológico y eliminación ecológica.

El *diseño* de los sistemas de cómputo ha tenido, por décadas, el único objetivo de incrementar la velocidad de procesamiento. Podría decirse que el requerimiento de hacer computadoras cada vez más rápidas vino principalmente de la computación de altas prestaciones, cuyo fin es acelerar la ejecución de aplicaciones computacionalmente complejas, normalmente científicas. Para estas aplicaciones se diseñaban supercomputadoras con la única intención de aumentar la cantidad de operaciones de coma flotante por segundo (FLOPS, *F*loating-*p*oint *O*perations per *S*econd). Esto se ve reflejado en la lista del TOP500 [1], que utiliza la métrica FLOPS para determinar el orden de clasificación de las supercomputadoras. Sólo importaban las prestaciones y, principalmente para el dueño de la supercomputadora, la relación precio/prestaciones. Pero esto ha cambiado. En la actualidad, el diseño de los sistemas de cómputo tiene como principal restricción el consumo ener-

gético, cambio que se ha producido primordialmente por la influencia de los siguientes factores. Las supercomputadoras se volvieron tan grandes que llegan a consumir tanta electricidad como una ciudad¹, no solo por su consumo específico sino también por la energía requerida para refrigerar el sistema y así asegurar su correcto funcionamiento, que se traduce en un enorme **costo económico** (y, posiblemente, ecológico y social²); se estima que cada 4 años el gasto en energía es equivalente al costo de adquisición de la supercomputadora. Otro factor tiene su origen en la **revolución de los dispositivos móviles**, de quienes cada vez se espera que realicen más procesamiento con iguales capacidades energéticas que obtienen de sus pequeñas baterías. El factor restante es conocido como **power wall**, y se refiere a una limitante física impuesta por la capacidad de refrigeración que puede alcanzarse utilizando técnicas convencionales (otras técnicas implicarían un aumento excesivo del costo).

Para estudiar la evolución de los procesadores, y observar el cambio que ha significado la consideración energética en el diseño de los mismos, utilizaremos la figura 1. Hasta el año 2005 no solo se ha doblado el número de transistores cada 18-24 meses para incrementar las prestaciones de los procesadores (ley de Moore), sino que también se ha doblado el consumo energético[7]. A partir del 2005 el número de transistores continuó incrementándose, pero el consumo energético se mantuvo constante. Este logro está basado en el desarrollo de procesadores con múltiples cores (nucleos) que trabajan a una menor frecuencia de reloj (menor cantidad de ciclos de reloj por unidad de tiempo). A modo de ejemplo, en el cuadro 1 se muestra una tabla comparativa de la línea de procesadores de Intel para servidores "Sandy Bridge-EP" (32 nm) Efficient Performance. Se puede observar la influencia de la velocidad del procesador en la potencia energética demandada, en tal caso, el Xeon E5-4650 tiene una frecuencia de reloj un 12,5 % mayor a la del Xeon E5-4640 pero demanda un 36,8 % más de potencia eléctrica³.

Enfocándonos en el dominio de nuestro inte-

¹En 2002, el Dr. Eric Schmidt, CEO de Google, dijo "lo que más importa a los diseñadores de computadoras de Google no es la velocidad sino el consumo energético, porque los centros de datos pueden consumir tanta electricidad como una ciudad" [8].

²La falta de explotación de las energías renovables y limpias hacen que la producción energética afecte en lo ecológico y social. La mayor cantidad (y más grandes) de las supercomputadoras del mundo están en EEUU, donde la mitad de la energía eléctrica en éste país se produce con carbón [2], impactando fuertemente en el medio ambiente, y la salud y riesgo de vida de las personas, por causa de la extracción del mineral y la contaminación por combustión

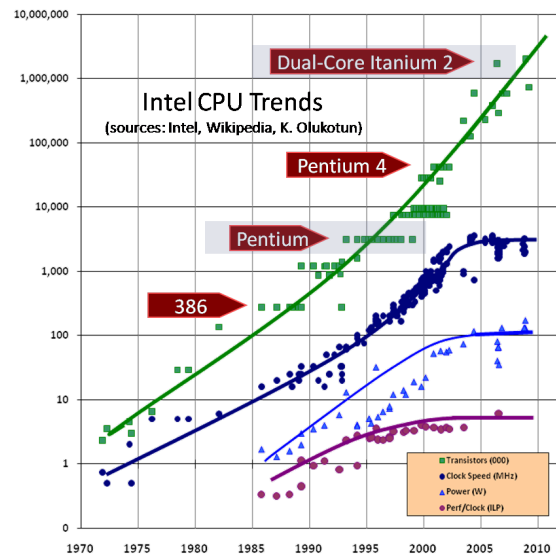


Figura 1: Evolución de los procesadores. Fuente: Intel

Model Number	Cores	Frequency	L2 cache	L3 cache	TDP	Socket	I/O bus
Xeon E5-4640	8	2.4 GHz	8 × 256 KB	20 MB	95 W	LGA 2011	2 × 8.0 GT/s QPI
Xeon E5-4650	8	2.7 GHz	8 × 256 KB	20 MB	130 W	LGA 2011	2 × 8.0 GT/s QPI

Cuadro 1: Características de procesadores Sandy Bridge-EP

res, la computación de altas prestaciones, podríamos decir que el gran hito que determinó la nueva era de la supercomputación ecológica data de 2007. En ese año, una nueva entidad denominada Green500, surgida como alternativa o complemento del TOP500, publica su primera lista que clasifica a las supercomputadoras de mayor eficiencia energética del mundo. Esta clasificación considera el rendimiento por W (FLOPS/W) de cada supercomputadora al ejecutar un cierto benchmark, donde el *diseño* y el *uso ecológico* son los factores que tienen una relación directa con el resultado alcanzado.

3. Línea de investigación

Nuestro trabajo no pretende desarrollar nuevas tecnologías hardware que tengan una mayor eficiencia energética (*diseño ecológico*), sino gestionar mediante software el hardware existente para reducir el consumo energético (*uso ecológico*). Nuestra investigación se enfoca en las siguientes temáticas energéticas aplicadas a sistemas de

del carbón, entre otros.

³La métrica utilizada en la tabla comparativa se denomina Thermal Design Power (TDP), que representa la máxima potencia que un sistema de refrigeración requiere disipar al ejecutar una "aplicación real".

computación de altas prestaciones:

1. Caracterización energética de los sistemas. La caracterización energética puede ser utilizada para comparar sistemas, para conocer el comportamiento energético del sistema bajo estudio y así diseñar aplicaciones con conocimiento de la energía, y ser un soporte para la construcción de modelos de predicción de potencia. Nos interesan plataformas basadas en CPUs (*Central Processing Unit*) y GPUs (*Graphics Processing Unit*).
2. Predicción de potencia. La predicción de la potencia es necesaria debido a que, en general, los sistemas no disponen de dispositivos internos de medición, en tiempo real, de la potencia demandada⁴; dispositivos externos son imprácticos para sistemas con gran número de nodos y procesadores por nodo. El objetivo de la predicción de potencia es permitir el desarrollo de algoritmos DVFS (ver siguiente punto) que no podrían ser propuestos sin esta información.
3. Diseño de algoritmos de escalado dinámico de frecuencia y tensión (DVFS, *Dynamic Voltage and Frequency Scaling*). La reducción de la tensión suministrada a un circuito reduce el consumo energético, sin embargo, incrementa el retardo de las compuertas lógicas que fuerza a reducir la frecuencia de reloj para que el circuito continúe trabajando correctamente. Basándose en este concepto, los algoritmos DVFS intentan reducir el consumo energético realizando cambios dinámicos de la frecuencia de reloj de los cores. Nos interesan diversos tipos de algoritmos:
 - a) Algoritmos de mejora de la eficiencia energética para sistemas de memoria compartida.
 - b) Algoritmos para aplicaciones SPMD (*Single Program, Multiple Data*) en *clusters* con procesadores multi-core.
 - c) Otros algoritmos: relación energía-rendimiento, limitación de potencia.
4. Estrategias energéticas en cloud computing. El cloud computing es un paradigma, relativamente nuevo, de cómputo distribuido que se presenta como una evolución natural del concepto de *clusters* y *grids*. Proporciona grandes conjuntos de recursos virtuales

⁴Hay excepciones, por ejemplo, la arquitectura Sandy Bridge de Intel cuenta con contadores de rendimiento que entregan mediciones de potencia.

(hardware, plataformas de desarrollo, almacenamiento y/o aplicaciones), fácilmente accesibles. Considerando sus grandes dimensiones, y la tendencia natural a que la plataforma escale para ampliar los servicios provistos, nos interesa estudiar las posibles alternativas que permitan reducir su alta demanda energética.

4. Resultados y objetivos

En referencia a la temática de caracterización energética de los sistemas, se ha estudiado la influencia de los modelos de programación paralela (OpenMP y MPI) y escalado de frecuencias de CPUs en sistemas de computación de altas prestaciones de memoria compartida [4]. También hemos estudiado los factores influyentes en el consumo energético de los sistemas de cómputo de altas prestaciones basados en CPUs y GPUs [5]. Posteriormente, hemos propuesto una metodología para caracterizar la potencia de sistemas de computación de altas prestaciones de memoria compartida [3]. La metodología involucra la búsqueda de factores influyentes en la potencia del sistema, realizando un análisis de sensibilidad de las propiedades de la carga de trabajo y parámetros del sistema en el comportamiento de potencia. La carga de trabajo considera aspectos de cómputo y comunicaciones de las aplicaciones. Esta metodología es similar a trabajos previos, pero nosotros proponemos un esquema de mayor profundidad que puede ayudar a mejorar la caracterización del sistema. También realizamos estudios sobre el impacto del sistema de Entrada/Salida en la eficiencia energética, que publicamos en [10].

Hemos propuesto un algoritmo de mejora de la eficiencia energética para sistemas de memoria compartida [6], basado en la aceleración de los relojes de los cores en momentos de bajo paralelismo. Actualmente, estamos realizando el testing de una implementación de ese algoritmo con la característica de que ejecuta de forma transparente al usuario y aplicación (no requiere instrumentación del código fuente). Asimismo, se está avanzando en la búsqueda de nuevas oportunidades orientadas a mejorar aún más la eficiencia energética.

Se está trabajando en la construcción de modelos para predicción de potencia de sistemas basados en CPUs que luego nos permitirá ampliar el espectro de propuestas de algoritmos DVFS. Estos son los casos de algoritmos cuyos objetivos podrían estar orientados a obtener la mejor relación energía-rendimiento, limitar la potencia demandada (útil para sistemas alimentados por

fuentes energéticas limitadas y de potencia variable (planta solar o eólica), entre otros.

Recientemente, se ha comenzado a trabajar en el desarrollo de un algoritmo DVFS para aplicaciones SPMD en clusters con procesadores multi-core. En cuanto al diseño de estrategias energéticas para implantar en entornos de cloud computing, es una temática de gran interés que estamos comenzando a estudiar.

5. Formación de recursos humanos

Los estudios aquí expuestos tienen como objetivo formar recursos humanos a nivel de grado y postgrado. En la Universidad Nacional del Comahue, hemos presentado una tesis de Licenciatura en Ciencias de la Computación en el tema de "Computación de Altas Prestaciones Ecológica con GPUs", y se está finalizando otra en el tema "Algoritmos de mejora de la eficiencia energética para sistemas de memoria compartida".

Es de especial interés promover, a docentes-investigadores y alumnos que trabajan en esta línea de investigación, la realización de estudios de maestría y doctorado en las instituciones participantes de la colaboración, la Universidad Nacional de La Plata y la Universidad Autónoma de Barcelona.

Referencias

- [1] Sitio web del top500: <http://www.top500.org/> (accedido en octubre de 2010).
- [2] U.s. geological survey, <http://energy.usgs.gov/coal.html> (accedido en octubre de 2010).
- [3] Javier Balladini, Enzo Rucci, Armando Eduardo De Giusti, Marcelo Naiouf, Remo Suppi, Dolores Rexachs del Rosario, and Emilio Luque Fadón. Power characterisation of shared-memory hpc systems. In *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2012.
- [4] Javier Balladini, Remo Suppi, Dolores Rexachs, and Emilio Luque. Impact of parallel programming models and cpus clock frequency on energy consumption of hpc systems. *Computer Systems and Applications, ACS/IEEE International Conference on*, 0:16–21, 2011.
- [5] Javier Balladini, Federico Uribe, Remo Suppi, Dolores Rexachs, and Emilio Luque. Factores influyentes en el consumo energético de los sistemas de computación de altas prestaciones basados en cpus y gpus. *XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACTC 2011)*, pages 271–281, 2011.
- [6] Belén Casanova, Javier Balladini, Armando Eduardo De Giusti, Remo Suppi, Dolores Rexachs del Rosario, and Emilio Luque Fadón. Mejora de la eficiencia energética en sistemas de computación de altas prestaciones. In *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2012.
- [7] Wu-Chun Feng. The importance of being low power in high-performance computing. *Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly (CT-Watch Quarterly)*, 1(3):11–20, August 2005.
- [8] John Markoff and Steve Lohr. Intel's huge bet turns iffy. *New York Times*, September 29, 2002.
- [9] San Murugesan. Harnessing green it: Principles and practices. *IT Professional*, 10:24–33, January 2008.
- [10] Javier Panadero, Sandra Méndez, Dolores Rexachs, Javier Balladini, Ismael Rodríguez, Adrián Pousa, Remo Suppi, and Emilio Luque. El impacto del sistema de entrada/salida en la eficiencia energética. In *XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2011.