

Novática, revista fundada en 1975 y decana de la prensa informática española, es el órgano oficial de expresión y formación continua de **ATI** (Asociación de Técnicos de Informática), organización que edita también la revista **REICIS** (Revista Española de Innovación, Calidad e Ingeniería del Software). **Novática** co-edita asimismo **UPGRADE**, revista digital de **CEPIS** (Council of European Professional Informatics Societies), en lengua inglesa, y es miembro fundador de **UPENET** (**UPGRADE** European **NET**work).

<<http://www.ati.es/novatica/>>
<<http://www.ati.es/reicis/>>
<<http://www.cepis.org/upgrade>>

ATI es miembro fundador de **CEPIS** (Council of European Professional Informatics Societies) y es representante de España en **IFIP** (International Federation for Information Processing); tiene un acuerdo de colaboración con **ACM** (Association for Computing Machinery), así como acuerdos de vinculación o colaboración con **AdaSpain**, **AIZ**, **ASTIC**, **RITSI** e **HispaLinux**, junto a la que participa en **ProInnova**.

Consejo Editorial

Ignacio Aguillo Sousa, Guillem Ainsa González, María José Escalona Cuaresma, Rafael Fernández Calvo (presidente del Consejo), Jaime Fernández Martínez, Luis Fernández Sanz, Didac Lopez Viñas, Celestino Martín Alonso, José Onofre Montesa Andrés, Francesc Noguera Puig, Ignacio Pérez Martínez, Andrés Pérez Payeras, Viktu Pons i Colomer, Juan Carlos Vigo López

Coordinación Editorial

Llorenç Pagés Casas <pages@ati.es>

Composición y autoedición

Jorge Lléser Gil de Ramales

Traducciones

Grupo de Lengua e Informática de ATI <<http://www.ati.es/gt/lengua-informatica/>>

Administración

Tomas Brunete, María José Fernández, Enric Camarero, Felicidad López

Secciones Técnicas - Coordinadores

Acceso y recuperación de la información

José María Gómez Hidalgo (Optenet), <jmgomez@optenet.es>

Manuel J. María López (Universidad de Huelva), <manuel.mana@diehsa.uhu.es>

Administración Pública electrónica

Francisco López Crespo (MAE), <flc@ati.es>

Arquitecturas

Enrique F. Torres Moreno (Universidad de Zaragoza), <enrique.torres@unizar.es>

Jordi Tubella Moragas (DAC-UPC), <jordit@ac.upc.es>

Auditoría SITIC

Marina Touriño Troitiño, <marinatourino@marinatourino.com>

Manuel Palao García-Suelto (ATI), <manuel@palao.com>

Derecho y tecnologías

Isabel Hernando Collazos (Fac. Derecho de Donostia, UPV), <isabel.hernando@ehu.es>

Elena Davara Fernández de Marcos (Davara & Davara), <edavara@davara.com>

Enseñanza Universitaria de la Informática

Cristóbal Pareja Flores (DSIP-UCM), <cpajef@isp.ucm.es>

J. Ángel Velázquez Hurtado (DLSI, URJC), <angel.velazquez@urjc.es>

Entorno digital personal

Andrés Marín López (Univ. Carlos III), <amarin@it.uc3m.es>

Diego Gachet Páez (Universidad Europea de Madrid), <gachet@uem.es>

Estándares Web

Encarna Quesada Ruiz (Virati), <encarna.quesada@virati.com>

José Carlos del Arco Prieto (TCP Sistemas e Ingeniería), <jcarco@gmail.com>

Gestión del Conocimiento

Juan Baiget Solé (Cap Gemini Ernst & Young), <jbaiget@ati.es>

Informática y Filosofía

José Ángel Olivás Varela (Escuela Superior de Informática, UCLM), <joseangel.olivas@uclm.es>

Roberto Feltrero Oreja (UNED), <rfeltrero@gmail.com>

Informática Gráfica

Miguel Chover Selles (Universitat Jaume I de Castellón), <mchover@lsi.uji.es>

Roberto Vivó Hernández (Engráficos, sección española), <rvivo@dsic.upv.es>

Ingeniería del Software

Javier Dolado Cosin (DLSI-UPV), <dolado@si.ehu.es>

Daniel Rodríguez García (Universidad de Alcalá), <daniel.rodriguez@uah.es>

Inteligencia Artificial

Vicente Boti Navarro, Vicente Julián Inglada (DSIC-UPV), <(vboti,vinglada)@dsic.upv.es>

Interacción Persona-Computador

Pedro M. Latorre Andrés (Universidad de Zaragoza, AIPO), <platorre@unizar.es>

Francisco L. Gutiérrez Vela (Universidad de Granada, AIPO), <fgutierrez@ugr.es>

Lengua e Informática

M. del Carmen Ugarte García (ATI), <cuarte@ati.es>

Lenguajes Informáticos

Oscar Belmonte Fernández (Univ. Jaime I de Castellón), <bellem@lsi.uji.es>

Inmaculada Coma Taty (Univ. de Valencia), <inmaculada.coma@uv.es>

Lingüística computacional

Xavier Gómez Guinovart (Univ. de Vigo), <xgg@uvigo.es>

Manuel Palomar (Univ. de Alicante), <mpalomar@dsi.ua.es>

Mundo estudiantil y jóvenes profesionales

Federico G. Mon Trotti (RITSI), <gmon.trotti@gmail.com>

Mike Salazar Peña (Área de Jóvenes Profesionales, Junta de ATI Madrid), <mikelno_uni@yahoo.es>

Profesión Informática

Rafael Fernández Calvo (ATI), <rfdc@ati.es>

Miguel Sarrías Grijó (ATI), <msarrias@ati.es>

Redes y servicios telemáticos

José Luis Marzo Lázaro (Univ. de Girona), <joseluis.marzo@udg.es>

Juan Carlos López López (UCLM), <juanccloles@uclm.es>

Robótica

José Cortés Arenas (Sopra Group), <joscort@semail.com>

Juan González Gómez (Universidad Carlos III), <juan@isearobotics.com>

Seguridad

Javier Arellito Bertolin (Univ. de Deusto), <jarellito@deusto.es>

Javier López Muñoz (ETS Informática-UMA), <jlm@lcc.uma.es>

Sistemas de Tiempo Real

Alejandro Alonso Muñoz, Juan Antonio de la Puente Alfaro (DIT-UPM), <faalonso@puente@dit.upm.es>

Software Libre

Jesus M. González Barahona (Universidad Politécnica de Madrid), <jm.gonzalez@upm.es>

Israel Herráiz Taberner (UAX), <isra@herraz.org>

Tecnología de Objetos

Jesus García Molina (DIS-UM), <jmolina@um.es>

Gustavo Rossi (LFIA-UNLP, Argentina), <gustavo@sol.info.unlp.edu.ar>

Tecnologías para la Educación

Juan Manuel Dodero Beardo (UC3M), <dodero@inf.uc3m.es>

César Pablo Córcoles Briogio (UOC), <ccorcoles@uoc.edu>

Tecnologías y Empresa

Didac López Vilas (Universitat de Girona), <didac.lopez@ati.es>

Francisco Javier Cantis Sánchez (Indra Sistemas), <fjantis@gmail.com>

Tendencias tecnológicas

Alonso Álvarez García (TID), <aad@tid.es>

Gabriel Marín Fuentes (Interbits), <gabi@atinet.es>

TIC y Turismo

Andrés Aguayo Maldonado, Antonio Guevara Plaza (Univ. de Málaga), <(aguayo, guevara)@lcc.uma.es>

Las opiniones expresadas por los autores son responsabilidad exclusiva de los mismos.

Novática permite la reproducción, sin ánimo de lucro, de todos los artículos, a menos que lo impida la modalidad de ©, o copyright, elegida por el autor, debiéndose en todo caso citar su procedencia y enviar a **Novática** un ejemplar de la publicación.

Coordinación Editorial, Redacción Central y Redacción ATI Madrid

Padilla 66, 3º dcha., 28006 Madrid

Tlf: 91 4029391; fax: 91 3093685 <novatica@ati.es>

Composición, Edición y Redacción ATI Valencia

Av. del Reino de Valencia 23, 46005 Valencia

Tlf: fax: 963330392 <secreval@ati.es>

Administración y Redacción ATI Cataluña

Via Laietana 46, ppal. 1º, 08003 Barcelona

Tlf: 934125236; fax: 934127713 <secregen@ati.es>

Redacción ATI Aragón

Lagasca 9, 3-B, 50006 Zaragoza

Tlf: fax: 976235181 <secreara@ati.es>

Redacción ATI Andalucía

Redacción ATI Galicia <secregal@ati.es>

Suscripción y Ventas

<<http://www.ati.es/novatica/interes.html>>, ATI Cataluña, ATI Madrid

Publicidad

Padilla 66, 3º dcha., 28006 Madrid

Tlf: 91 4029391; fax: 91 3093685 <novatica@ati.es>

Imprenta: Derra S.A., Juan de Austria 66, 08005 Barcelona

Depósito legal: B 16.154-1975 - ISSN: 0211-2124; CODEN: NOVACE

Portada: La escarga luminosa - Concha Arias Pérez / © ATI

Diseño: Fernando Agresta / © ATI 2003

editorial

Implicaciones de las TIC verdes > 02

noticias de IFIP

Resumen de la Asamblea General de IFIP 2011 > 03

Ramón Puigjaner Trepal

Reunión anual del TC-2 (Software – Theory and Practice) > 06

Antonio Vallecillo Moreno

actividades de ATI

Entrega de la V Edición del Premio Novática > 03

en resumen

Informática y conservación del planeta > 10

Llorenç Pagés Casas

monografía

TIC verdes: Tendencias y retos

(En colaboración con UPGRADE)

Editores invitados: Juan Carlos López López, Giovanna Sissa, Lasse Natvig

Presentación. TIC verdes: El compromiso de la Sociedad

de la Información con un desarrollo sostenible > 07

Juan Carlos López López, Giovanna Sissa, Lasse Natvig

Encuesta de CEPIS sobre TIC verdes – Examinando la conciencia sobre

TIC verdes en las organizaciones: Hallazgos iniciales > 11

Carol-Ann Kogelman en nombre del Green ICT Task Force de CEPIS

Los cinco temas más descuidados en las TI verdes > 15

Lorenz M. Hilty, Wolfgang Lohmann

Servicios de computación: oportunidades "verdes" y riesgos > 19

Giovanna Sissa

El software bueno, el bello y el malo – en busca de los factores verdes

de calidad de software > 24

Juha Taina

Técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid) > 29

María José Santolimia Romero, Xavier del Toro García, Juan Carlos López López

Computación verde: economizando energía a través de la regulación,

la simplicidad y la paralelización > 35

Lasse Natvig, Alexandru Ciprian Iordan

Hacia un Cloud Computing sostenible en Europa > 42

Kien Le, Thu D. Nguyen, Iñigo Goiri, Ricardo Bianchini, Jordi Guitart Fernández, Jordi Torres Viñals

Eficiencia energética en centros de proceso de datos:

Investigación y realidad práctica > 47

Marina Zapater Sancho, Patricia Arroba García, José Manuel Moya Fernández, Zorana Bankovic

secciones técnicas

Informática Gráfica

Modelos de Papel 3D Personalizados: papermodels.uji.es > 52

José Ribelles Miguel, M^a Ángeles López Malo

Interacción Persona-Computador

ObservAR, sistema de realidad aumentada multiusuario para exposiciones > 57

Jesus Gimeno, Ricardo Olanda, Bibiana Martínez, Fernando M. Sanchez

Tecnologías y empresa

Impactos derivados de la adhesión a un código de conducta en materia

de contratación electrónica > 61

David López Jiménez, María Dolores Gallego Pereira, Salvador Bueno Ávila

Referencias autorizadas > 66

sociedad de la información

Programar es crear

El problema de la función exponencial

(Competencia UTN-FRC 2010, problema A, enunciado) > 74

Julio Javier Castillo, Diego Javier Serrano

El problema del decodificador

(Competencia UTN-FRC 2010, problema C, solución) > 75

Julio Javier Castillo, Diego Javier Serrano

asuntos interiores

Coordinación editorial / Programación de Novática / Socios Institucionales > 77

Tema del próximo número: "Gestión de riesgos"

Marina Zapater Sancho,
Patricia Arroba García, José
Manuel Moya Fernández,
Zorana Bankovic

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Universidad Politécnica de Madrid

<{marina,parroba,josem,zorana}@die.upm.es>

Eficiencia energética en centros de proceso de datos: Investigación y realidad práctica

1. Introducción

Hoy en día, inmersos en la sociedad de la información, el motor que impulsa la economía ha pasado de ser los combustibles fósiles y la electricidad a ser la información. Pero el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) no se ha restringido únicamente al campo económico, sino que se ha extendido a toda la sociedad. Los ordenadores y los dispositivos electrónicos se encuentran en casi todas las áreas de la actividad humana. En este aspecto, los Centros de Proceso de Datos (CPDs) se han convertido en un elemento clave en la sociedad.

Es fácil encontrar CPDs en todos los sectores económicos, dado que proveen la infraestructura computacional para un gran abanico de aplicaciones y servicios, que cubren desde las necesidades específicas de las redes sociales hasta los requisitos de la computación de altas prestaciones. Además, la preocupación por la fiabilidad de los CPDs, entendida como una preocupación por la seguridad de estas infraestructuras (desde el punto de vista de la seguridad de la información) está ganando mucha importancia en un mundo en el que la posesión más valiosa de una compañía es la información. La pérdida de información, o el hecho de que ésta no esté disponible, implica grandes pérdidas económicas.

En este artículo estudiaremos el estado del arte en eficiencia energética de los CPDs actuales. Tras presentar los problemas básicos de los CPDs en el presente, en la **siguiente sección**, estudiaremos las posibles soluciones desde dos perspectivas diferentes. En la **sección 3** repasaremos las tendencias actuales en cuanto a eficiencia energética para sistemas de altas prestaciones, mientras que la **sección 4** expandirá este estudio hacia los CPDs para *Cloud Computing* (computación en la nube). Ambas secciones estudiarán el problema desde el punto de vista de la investigación. Por otro lado, la **sección 5** estudiará cuántos de estos avances tecnológicos ofrecidos por la investigación están teniendo una penetración real en el mercado, y cuáles son las soluciones reales implementadas en los CPDs. Finalmente, algunas conclusiones sobre el distanciamiento entre investigación e industria en los CPDs se explicarán en la **sección 6**.

2. Presentación del problema

2.1. El problema de la energía

Durante décadas, los CPDs se han centrado

Resumen: La eficiencia energética se ha convertido en un problema de gran importancia en los Centros de Proceso de Datos (CPDs) actuales. Métricas como Top500, centradas en la velocidad y el rendimiento, están empezando a perder importancia frente a otras como Green500. A fin de aumentar la eficiencia energética de CPDs y reducir costes, la comunidad científica propone soluciones tanto desde el punto de vista de la reducción de consumo computacional como de refrigeración, mientras que instituciones, tanto europeas como estadounidenses, publican manuales de buenas prácticas para la gestión eficiente de CPDs. Sin embargo, a pesar de que sí está habiendo una implantación real de las buenas prácticas propuestas, la mayoría de las soluciones ideadas por los investigadores aún no se están utilizando en entornos de producción reales. Este artículo realiza un estudio sobre las soluciones propuestas por la comunidad científica, así como de las prácticas reales que se implementan en los CPDs, con el fin de hallar las razones que crean un pequeño abismo entre la investigación y la innovación en CPDs.

Palabras clave: Centros de Proceso de Datos, computación de altas prestaciones, CPDs verdes, eficiencia energética, fiabilidad, planificación de tareas, refrigeración, sistemas heterogéneos.

Autores

Marina Zapater Sancho obtuvo el título de Ingeniera de Telecomunicación y el título de Ingeniera Electrónica por la *Universitat Politècnica de Catalunya* en 2010. Actualmente es estudiante de Doctorado en la Universidad Politécnica de Madrid. En marzo de 2011, obtuvo una Beca de Investigación del Programa Internacional de Captación de Talento (PICATA) del Campus de Excelencia Internacional de Moncloa. Su investigación se centra en la optimización térmica de sistemas heterogéneos complejos, en la optimización térmica proactiva y reactiva de Centros de Proceso de Datos y en la seguridad para sistemas empotrados.

Patricia Arroba García obtuvo el título de Ingeniera de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid en 2011. Actualmente está realizando el doctorado en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la misma universidad. Su investigación se centra en la optimización térmica de sistemas complejos y en el desarrollo de dispositivos móviles accesibles.

José Manuel Moya Fernández es Profesor Contratado Doctor en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid. Obtuvo los títulos de Ingeniero de Telecomunicación y Doctor en Ingeniería de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid en 1999 y 2003, respectivamente. Ha participado activamente en un gran número de proyectos de investigación nacionales y proyectos bilaterales con la industria en el campo del diseño y optimización de sistemas empotrados y en la optimización de seguridad en sistemas empotrados y sistemas empotrados distribuidos. En este campo, es co-autor de un gran número de publicaciones en prestigiosas revistas y conferencias. Su investigación actual se centra en medidas proactivas y reactivas para la optimización térmica en CPDs y en el diseño de técnicas y herramientas para la eficiencia energética en aplicaciones computacionalmente intensivas para sistemas empotrados.

Zorana Bankovic obtuvo el título de *Electrical Engineer* por la *Faculty of Electrical Engineering* de la *University of Belgrade* (Serbia) en 2005 y el título de Doctora por la Universidad Politécnica de Madrid en 2011. Actualmente, es investigadora en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid. Su investigación trata sobre los sistemas de reputación y la detección de intrusos energéticamente eficiente para redes de sensores inalámbricas basadas en técnicas de inteligencia artificial.

en incrementar su rendimiento, medido exclusivamente como velocidad. Ejemplos de esto incluyen la lista Top500, que aglutina a los supercomputadores más rápidos del mundo [1], basada en calcular la velocidad como

operaciones de coma flotante por segundo (FLOPS). Sin embargo, este aumento de velocidad no ha sido gratuito, dado que los avances en eficiencia energética no han sido tan rápidos. Así, en 2007, aunque la velocidad

monografía TIC verdes: Tendencias y retos

se había multiplicado por 10.000 desde 1992, el rendimiento por vatio sólo se había multiplicado por 300 [2]. El rápido crecimiento de las capacidades de computación se ha traducido en un importante aumento del consumo energético de las infraestructuras, no sólo en cuanto a los servidores, sino también en cuanto al sistema de refrigeración. El consumo de energía de los CPDs tenía un impacto global que en 2009 significaba el 2% de la producción energética mundial [3].

La evolución de consumo energético, puede verse en la **figura 1**. En los CPDs más modernos, los gastos de infraestructura representan cerca el 30% de gasto total del CPD. El coste de refrigeración es uno de los que más contribuye al total de la factura energética de los CPDs, mientras que otro 10-15% se debe a las pérdidas de conversión y rendimiento de la transformación de energía [6].

Actualmente, cada megavatio (MW) de potencia consumida por un supercomputador requiere de 0.7 MW de refrigeración. En 2006, los CPDs sólo en EEUU consumieron un total de 59 billones de kWh de electricidad, que costaron 4,1 billones de dólares de factura eléctrica y produjeron 864 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂). Estos valores son equivalentes a un 2% del total de la factura eléctrica de EEUU, y se prevé que esas cifras alcancen un 3% en 2010 [7].

El advenimiento de la computación en la nube ha llevado a un todavía más rápido crecimiento del número de CPDs. Esto se traduce de forma inmediata en una necesidad de reducir los costes de las infraestructuras (es decir, hacerlas más eficientes) y de los servidores.

2.2. El paso hacia los CPDs verdes

Los factores mencionados anteriormente han contribuido a que exista una concienciación acerca de la necesidad de eficiencia energética para CPDs. Hoy, métricas como la de estar en la lista Green500 [8] están empezando a cobrar una mayor importancia. Para estar en la lista Green500, los CPDs tienen que realizar un informe sobre el consumo medio del CPD (FLOPS/W) durante la ejecución del *benchmark* LINPACK HPL [10].

Compañías como Google o IBM están ya implementando medidas para que sus CPDs sean más eficientes, utilizando la medida de *power usage effectiveness* (PUE) como parámetro de eficiencia energética. El PUE puede calcularse como el total de energía consumida por el CPD dividido por la energía consumida sólo por los equipos.

Por otra parte, organismos de todo el mundo están empezando a publicar documentos sobre buenas prácticas que permitan mejorar la eficiencia energética de los CPDs, y promueven la creación de redes a las cuales pueden adherirse los dueños de CPDs que cumplan con esas buenas prácticas. Es el caso del "*Code of Conduct on Data Centres Energy Efficiency published by the European Commission*" de 2008 [11] o del informe sobre eficiencia energética del *US Department of Energy*, a través del programa Energy Star, publicado en 2007 [5].

2.3. La importancia de la fiabilidad

Es importante tener en cuenta que el ahorro energético no puede ser obtenido a costa de la fiabilidad de los equipos. Soluciones al problema de la energía que impliquen una dismi-

nución del tiempo medio de vida de los servidores no serán deseables.

Esta es la razón por la cual algunas organizaciones como ASHRAE [12] publican métricas acerca de la temperatura máxima de entrada del aire a un servidor para que la fiabilidad no se vea afectada. Hay una gran discusión en la literatura sobre este tema, dado que algunos autores piensan que por cada 10°C que se incremente la temperatura de entrada al servidor por encima de los 21°C, la fiabilidad de los componentes electrónicos de larga duración decae un 50% [13]. Los informes de ASHRAE, sin embargo, encuentran que estos estudios no se basan en hechos sólidos y permite temperaturas de entrada de aire muy superiores (de hasta 27°C según su recomendación del año 2008). Tal y como veremos en la siguiente sección, aunque este aspecto es clave para la fiabilidad, también existe otra serie de factores de mucha importancia que con frecuencia son pasados por alto.

3. Eficiencia energética en computación de altas prestaciones

La investigación en cuanto a eficiencia energética para altas prestaciones se ha centrado en dos campos distintos. Por una parte, soluciones que implican la reducción de la energía de computación (algunas de ellas también centradas en la fiabilidad), y por otra parte, otras que intentan reducir los costes de la infraestructura de refrigeración. Pese a que no hay impedimento alguno para que estas dos vías fueran estudiadas de forma conjunta, en general son tratadas como dos realidades separadas del mismo problema. Sólo en algunos casos podemos encontrar contribucio-

Figure 2-1. Electricity Use by End-Use Component, 2000 to 2006

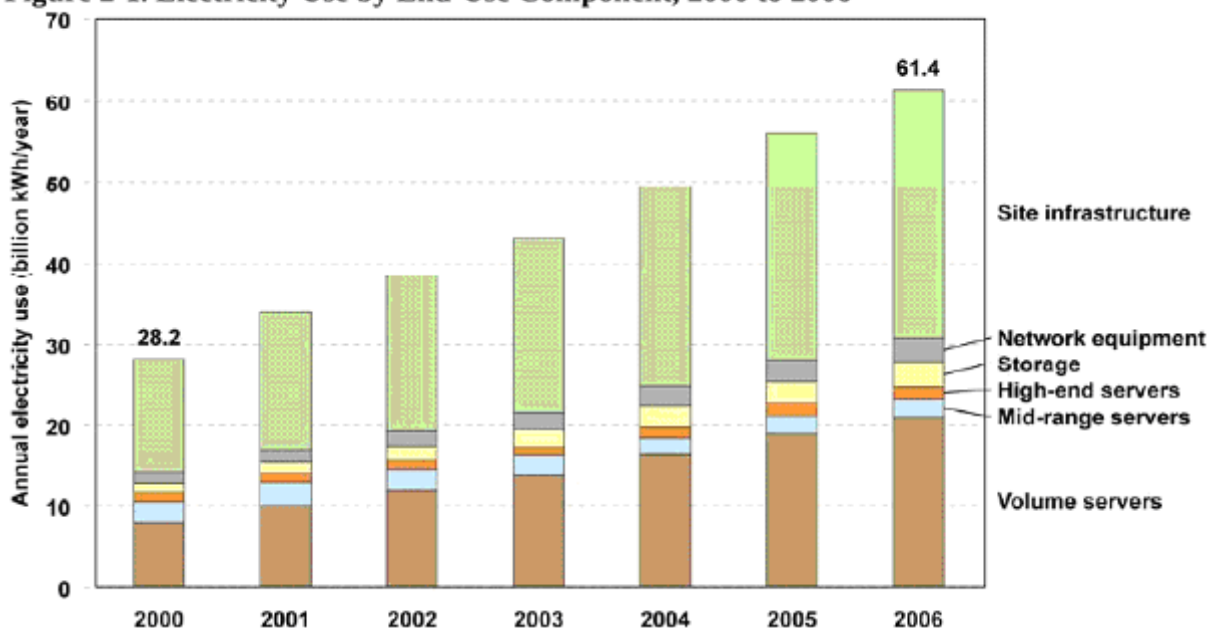


Figura 1. Uso de la electricidad por componente. Fuente: [5].

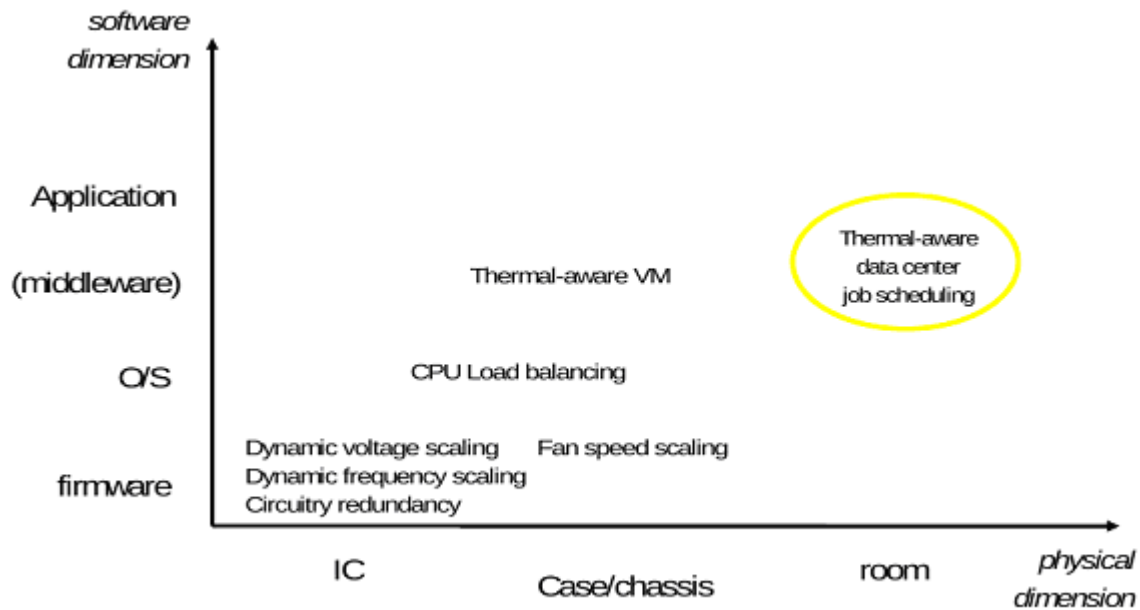


Figura 2. Estrategias para mejorar la eficiencia energética. [Fuente: Impact Lab].

nes que tengan en cuenta ambos aspectos [14].

En la **figura 2**, podemos encontrar un resumen de todas las estrategias de eficiencia energética para altas prestaciones, que exponemos en las siguientes secciones.

3.1. Eficiencia energética y fiabilidad

Las primeras soluciones que tienen en cuenta tanto la eficiencia energética como la fiabilidad son aquellas de más bajo nivel, que hacen aproximaciones desde el nivel de chip y circuito en la etapa de diseño. Ésta es una aproximación muy común al problema en cuanto a fiabilidad, dado que los problemas que tienen un mayor impacto en el tiempo de vida de los circuitos se pueden solucionar en esta etapa [12]. Los problemas de fiabilidad más comunes en los CPDs son la electromigración (EM), causada por la aparición de "puntos calientes" (*hot-spots*), y los ciclos térmicos, resultados de cargas poco balanceadas en los servidores.

La reducción de *hot-spots*, además de aumentar la fiabilidad, disminuye el esfuerzo de refrigeración, dado que no se alcanzan temperaturas tan altas en los chips. Por esa razón la mayoría de soluciones se han centrado en la reducción de *hot-spots*. Es el caso de artículos basados en el posicionamiento térmico de procesadores (*floorplanning*), especialmente en el mundo de los MPSoCs [16][17][18] y en los algoritmos de planificación y asignación de tareas [19].

Aunque a primera vista el mundo de los MPSoCs no sea el mismo que el de los CPDs,

el uso de sistemas empotrados para dispositivos de altas prestaciones, que permitan asignarles tareas sin restricciones temporales, cobra cada vez mayor importancia. Algunos artículos se centran en intentar encontrar los bloques de máquinas que permiten una mayor eficiencia energética en un CPD entre servidores, ordenadores convencionales, dispositivos móviles y empotrados [20].

Subiendo en el nivel de abstracción, nos encontramos con aproximaciones a nivel de sistema operativo, que permiten la planificación eficiente de tareas, como el balanceo de calor y la ejecución diferida de tareas calientes [21]. Es por ejemplo el caso de algoritmos como Greedy que previenen la aparición de *hot-spots* y distribuciones de temperatura poco balanceadas, a la vez que aseguran que la temperatura de entrada del aire de los servidores no exceda de determinado umbral [4].

Sin embargo, es a nivel de servidor donde nos encontramos con las medidas más populares para reducir la temperatura sin impacto en el rendimiento. Estas soluciones se basan en *Dynamic Voltage Frequency Scaling* (DVFS) [22] (que es una técnica de adaptación automática del voltaje y la frecuencia de trabajo de los servidores), *Vary-On Vary-Off* (VOVF) y todas las técnicas basadas en apagado de máquinas infrautilizadas [23].

Al nivel más alto, nos encontramos con técnicas basadas en la planificación de tareas atendiendo al consumo de potencia [24], o incluso que tienen en cuenta las características de la carga que se va a ejecutar [25].

Las aproximaciones más novedosas tienen en cuenta algunas capacidades que se utilizan fundamentalmente en *Cloud Computing*, y

que se basan en la virtualización, tal y como veremos en la siguiente sección [27].

3.2. La perspectiva centrada en la refrigeración

La eficiencia energética desde el punto de vista de la refrigeración, explota dos hechos diferentes. En primer lugar, la eficiencia energética se puede mejorar teniendo en cuenta que hay localizaciones físicas del CPD que son más económicas de enfriar que otras. Si se asignan cargas mayores a esas zonas, la planificación será más eficiente en términos de energía de refrigeración [7][13]. Por otra parte, otras aproximaciones tratan de maximizar la temperatura de salida del aire de los sistemas de refrigeración, o de minimizar la recirculación de aire en la sala, con el fin de que la refrigeración sea más eficiente. Por ejemplo, en [28] se asignan menos tareas a aquellos chasis que demuestran tener una recirculación de aire mayor.

Algunos algoritmos funcionan bien para este tipo de situaciones, como son "*Uniform Outlet Profile*", que trata de mantener uniforme la temperatura del aire que sale de los servidores, "*Minimal Computing Energy*", que genera planificaciones que minimizan la energía de refrigeración consumida o "*Coollest Inlet*", que distribuye la carga de forma que se asigne primero la carga a los servidores que tengan una temperatura de entrada del aire menor [29]. Finalmente, otros algoritmos se basan en el balanceo de cargas, migrando tareas desde zonas más térmicamente saturadas a zonas vecinas más frías [30].

Ambas aproximaciones están basadas en tener en cuenta los efectos termodinámicos de

monografía TIC verdes: Tendencias y retos

la sala de servidores. Para probar las tesis mencionadas anteriormente, es muy común la utilización de software de simulación de dinámica de fluidos, como por ejemplo Flovent (de Mentor Graphics) [32]. Este software calcula el rendimiento de la sala de servidores, permitiendo a los investigadores probar la bondad de sus algoritmos.

4. La contribución de Cloud Computing

La proliferación de la computación en la nube ha dado una nueva visión al problema de la eficiencia energética. La tecnología clave actual para eficiencia energética en servidores de *Cloud Computing* es la virtualización. El CPD para *Cloud Computing* es, por definición, heterogéneo. La heterogeneidad puede ser pasada por alto en CPDs para computación de altas prestaciones, pero tiene que ser tenida en cuenta para los CPDs de *Cloud Computing*. La virtualización es útil en el sentido de que permite abstraer la heterogeneidad de los servidores y por tanto asignar y migrar tareas fácilmente.

Ésta sin embargo, no puede ser la única práctica llevada a cabo. Algunas soluciones para CPDs se basan en la utilización de máquinas virtuales y proponen investigar la demanda de recursos y caracterizar las tareas para realizar la migración, sin degradación en la Calidad de Servicio (QoS) [33]. La idea es encontrar la asignación de tareas que consumirá el mínimo de energía en los servidores, evitando cuellos de botella y máquinas infrautilizadas [34].

Concretamente, la computación en la nube permite el uso de políticas de apagado de máquinas y optimización de protocolos de red, de forma que permita mejorar la eficiencia energética de la red. Esto se debe a que la cantidad de datos transmitidos por Internet, con el aumento de los CPDs para *Cloud Computing*, se ha incrementado exponencialmente. Con el fin de crear CPDs ecológicos, es necesario llevar a cabo algoritmos de replicación de contenidos y disseminación que tengan, como parámetro clave, la optimización energética [35].

Uno de los problemas que deben resolver los CPDs virtualizados es el de la asignación de máquinas virtuales a recursos. Desde el punto de vista energético, el objetivo será asignar las máquinas mediante algoritmos que maximicen la eficiencia energética [36][37]. Tal y como puede verse, la necesidad de que los CPDs para *Cloud Computing* se conviertan en "verdes", ha llevado a la proliferación de algoritmos que tengan en cuenta virtualización, heterogeneidad y demanda de red. Esto abre la puerta a nuevos caminos en la investigación, que puedan reutilizar las herramientas desarrolladas en *Cloud* para los sistemas de altas prestaciones.

5. Soluciones reales en los CPDs actuales

En primer lugar, debe tenerse en cuenta que, desde el punto de vista del responsable del CPD, su infraestructura es algo más que sistemas de refrigeración y equipos electrónicos. Son entornos reales de producción que no pueden asumir la integración de nuevas herramientas que pongan en peligro los servicios que ofrecen a los clientes. Todas las soluciones que quieran llegar al mercado, deberán tener en cuenta las restricciones impuestas por los CPDs, como son la de sólo implantar soluciones estables que no pongan en peligro la disponibilidad de las máquinas. Por supuesto, existen medidas que ya se están poniendo en práctica en CPDs. La mayoría están relacionadas con las buenas prácticas propuestas por las instituciones, más que con la innovación propuesta por la investigación. Es cierto que algunos CPDs (como los de IBM con sus máquinas BlueGene, en lo alto de la lista de Green500) están empezando a medir su PUE y han llevado a cabo acciones encaminadas al aislamiento de zonas frías y calientes. La tendencia de mantener la temperatura de salida de aire lo más baja posible sigue produciéndose, pese a que las recomendaciones energéticas lo desaconsejan.

Sólo algunas de las compañías más innovadoras, como Google, aplican medidas para ahorrar costes energéticos. Google anunció en 2008 que su *Container Datacenter* [38] tenía un PUE efectivo de 1,25. Esta gran eficiencia se alcanza, por un lado, gracias a intercambiadores de calor, una distribución energética de alto rendimiento y sistemas de *free cooling*. Por otra parte, Google presta mucha atención al aislamiento de pasillos fríos y caliente, a no mezclar flujos de aire y a mantener las zonas frías a temperaturas elevadas (de hasta 27°C, que es el límite que da la recomendación de ASHRAE de 2008).

6. Conclusiones

La realidad de los CPDs actuales parece, a primera vista, bastante alejada de la investigación en ese campo. Las soluciones propuestas por los departamentos universitarios están alejadas tanto de las soluciones comerciales para CPDs como de las propuestas por la propia industria.

Muchas contribuciones científicas asumen CPDs irreales (salas más pequeñas que las reales con grandes problemas de recirculación y mezcla de flujos de aire frío/caliente). Aunque es cierto que en muchos CPDs los problemas relacionados con la recirculación son graves, ya existen soluciones comerciales basadas en la mejora de circulación de los flujos de aire y el aislamiento que solucionan en gran parte el problema. Las contribuciones realmente importantes, aquellas relacionadas con la regulación de la refrigeración y la planificación energéticamente eficiente, sin

embargo, todavía no se han probado y utilizado en CPDs en producción. Sólo se han llevado a cabo algunas pruebas piloto en CPDs experimentales, pero ninguna de estas soluciones está presente en la industria.

Los CPDs más eficientes (aquellos que ocupan las primeras posiciones en la lista de Green500) no utilizan algoritmos automáticos de planificación y asignación de tareas, y tampoco utilizan sistemas automáticos de regulación de la temperatura de salida del sistema de refrigeración. En general, se limitan a seguir los manuales de buenas prácticas y las recomendaciones hechas por las instituciones mencionadas anteriormente.

Existe un gran vacío entre las contribuciones de los investigadores y los productos ofrecidos por la industria. Pese a que algunas soluciones parecen listas para su implantación, la innovación en este sector se encuentra frente a un gran número de barreras de entrada cuando se trata de la implantación en entornos de producción reales. Las empresas tienen que estar muy seguras de la robustez de las soluciones y de su fiabilidad para permitir que éstas se utilicen en entornos reales, dado que soluciones inestables podrían causar grandes pérdidas económicas para los dueños de los CPDs.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de la Secretaría de Estado de Investigación, bajo el proyecto AMILCAR TEC2009-14595-C02-01; a través de la Secretaría General de Innovación bajo el proyecto P8/08 dentro del Plan Nacional para Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Técnica 2008-2011 y por el Campus de Excelencia Internacional (CEI) de Moncloa, a través de una Beca del Programa de Captación de Talento (PICATA).

Referencias

- [1] **TOP500 Supercomputing Sites**. 2009. [Último acceso 25 octubre 2011, en <<http://top500.org/>>.]
- [2] **W. Feng, K. Cameron**. «*The Green500 List: Encouraging Sustainable Supercomputing*». *Computer*, 40(12), pp. 50-55, 2007.
- [3] **J.M. Kaplan, W. Forrest, N. Kindler**. «*Revolutionizing Data Center Energy Efficiency*». McKinsey & Company, julio 2008.
- [4] **E. Pakbaznia, M. Pedram**. «*Minimizing data center cooling and server power costs*». Proceedings of the 14th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '09 (p. 145). New York, New York, USA: ACM Press, 2009.
- [5] **U. D. Of Energy**. «*Report to Congress on Server and Datacentre Energy Efficiency*». Public Law, pp. 109-431, 2007.
- [6] **C. Bash, G. Forman**. «*Cool job allocation: Measuring the power savings of placing jobs at cooling-efficient locations in the datacentre*». 2007 USENIX Annual Technical Conference on Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference (pp. 17-22). USENIX Association, 2007.
- [7] **T. Mukherjee, A. Banerjee, G. Varsamopoulos, S.K.S. Gupta, S. Rungta**. «*Spatio-temporal thermal-aware job scheduling to minimize energy consumption in virtualized heterogeneous datacentres*». *Computer Networks*, 53(17), pp. 2888-2904, 2009.
- [8] **The Green500 List**. Environmentally Responsible Supercomputing. [Último acceso 25 octubre 2011, en <<http://www.green500.org/>>.]
- [9] **B. Subramaniam, W. Feng**. «*Understanding Power Measurement Implications in the Green500 List*». 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (pp. 245-251). IEEE, 2010.
- [10] **Linpack HPL Benchmark for HPC**. [Último acceso 10 octubre 2011, en <<http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>>.]
- [11] **European Commission, European Union's Joint Research Centre (JRC)**. «*Code of Conduct on Data Centres Energy Efficiency Version 1.0*». Octubre, pp.1-20, 2008.
- [12] **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**. «*ASHRAE Environmental Guidelines for Datacom Equipment - Expanding the Recommend Environmental Envelope*», 2008.
- [13] **J. Moore, J. Chase, P. Ranganathan, R. Sharma**. «*Making scheduling 'cool': Temperature-aware workload placement in datacentres*». USENIX Association Proceedings of the General Track: 2005 UNENIX Annual Technical Conference, pp. 61-74, 2005.
- [14] **A. Banerjee, T. Mukherjee, G. Varsamopoulos, E.K.S Gupta**. «*Integrating Cooling Awareness with Thermal Aware Workload Placement for HPC Datacentres*». Impact Lab. Arizona State University, 2011.
- [15] **D. Atienza, G. De Micheli, L. Benini, J.L. Ayala, P.G.D. Valle, M. DeBole, V. Narayanan**. «*Reliability-aware design for nanometer-scale devices*». Proceedings of the 2008 Asia and South Pacific Design Automation Conference (pp. 549-554). IEEE Computer Society Press, 2008.
- [16] **Y. Han, I. Koren, C. Moritz**. «*Temperature aware floorplanning*». Proc of the Second Workshop on TemperatureAware Computer Systems, 2005.
- [17] **Y. Han, I. Koren**. «*Simulated Annealing Based Temperature Aware Floorplanning*». *Journal of Low Power Electronics*, 3(2), pp. 141-155, 2007.
- [18] **W. Hung, Y. Xie, N. Vijaykrishnan, C. Addo-Quaye**. «*Thermal-aware floorplanning using genetic algorithms*». International Symposium on Quality Electronic Design, 2005.
- [19] **Y. Xie, W.L. Hung**. «*Temperature-aware task allocation and scheduling for embedded multiprocessor systems-on-chip (MPSoC) design*». *The Journal of VLSI Signal Processing*, 45(3), pp. 177-189. Springer, 2006.
- [20] **L. Keys, S. Rivoire, J.D. Davis**. «*The Search for Energy-Efficient Building Blocks for the Datacentre*». Workshop on Energy-Efficient Design, 2007.
- [21] **J. Choi, C.Y. Cher, H. Franke, H. Hamann, A. Weger, P. Bose**. «*Thermal-aware task scheduling at the system software level*». Proceedings of the 2007 international symposium on Low power electronics and design (pp. 213-218). ACM New York, NY, USA, 2007.
- [22] **C-H.Hsu, W-C. Feng**. «*A Power-Aware Run-Time System for High-Performance Computing*». ACM/IEEE SC 2005 Conference SC05, (noviembre), 1-1. IEEE, 2005.
- [23] **X. Zheng, Y. Cai**. «*Markov Model Based Power Management in Server Clusters*». International Conference on Green Computing and Communications (pp. 96-102). IEEE, 2010.
- [24] **X. Zhu, C. He, Y. Bi, D. Qiu**. «*Towards Adaptive Power-Aware Scheduling for Real-Time Tasks on DVS-Enabled Heterogeneous Clusters*». 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (pp. 117-124). IEEE, 2010.
- [25] **W. Felter, K. Rajamani, T. Keller, C. Rusu**. «*A performance-conserving approach for reducing peak power consumption in server systems*». Proceedings of the 19th annual international conference on Supercomputing ICS 05, pp. 293-302. ACM Press, 2005.
- [26] **C. Bodenstein, G. Schryen, D. Neumann**. «*Reducing Datacentre Energy Usage Through Efficient Job Allocation*». ECIS 2011 Proceedings. Brill, K. G. (2007).
- [27] **J. Xu, J.A.B. Fortes**. «*Multi-Objective Virtual Machine Placement in Virtualized Datacentre Environments*». 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (pp. 179-188), 2010.
- [28] **Q. Tang, E.K.S. Gupta, G. Varsamopoulos**. «*Thermal-aware task scheduling for datacentres through minimizing heat recirculation*». En IEEE Cluster, 2007.
- [29] **S.K.S. Gupta, G. Varsamopoulos**. «*Energy-Efficient Thermal-Aware Task Scheduling for Homogeneous High-Performance Computing Datacentres: A Cyber-Physical Approach*». *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 19(11), pp. 1458-1472, 2008.
- [30] **G. Varsamopoulos, A. Banerjee, S.K.S. Gupta**. «*Energy efficiency of thermal-aware job scheduling algorithms under various cooling models*». *Contemporary Computing*, pp. 568-580. Springer, 2009.
- [31] **G. Wu, Z. Xu, Q. Xia, J. Ren, F. Xia**. «*Task Allocation and Migration Algorithm for Temperature-Constrained Real-Time Multi-Core Systems*». 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (pp. 189-196). IEEE, 2010.
- [32] **Flomerics Ltd**. «*Flovent version 2.1*» Hampton Court, Surrey, KT8 9HH, England, 1999. <<http://www.flomerics.com/>>.
- [33] **K. Ye, D. Huang, X. Jiang, H. Chen, S. Wu**. «*Virtual Machine Based Energy-Efficient Datacentre Architecture for Cloud Computing: A Performance Perspective*». 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing, pp. 171-178. IEEE, 2010.
- [34] **S. Srikantaiah, A. Kansal, F. Zhao**. «*Energy aware consolidation for cloud computing*», 2008.
- [35] **A. Berl, E. Gelenbe, M. Di Girolamo, G. Giuliani, H. De Meer, M.Q. Dang, K. Pentikousis**. «*Energy-Efficient Cloud Computing*». *The Computer Journal*, 53(7), pp. 1045-1051, 2009.
- [36] **A. Beloglazov, J. Abawajy, R. Buyya**. «*Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of datacentres for Cloud computing*». *Future Generation Computer Systems*, 2011.
- [37] **R. Buyya, A. Beloglazov, J. Abawajy (n.d.)**. «*Energy-Efficient Management of Datacentre Resources for Cloud Computing: A Vision, Architectural Elements, and Open Challenges*».
- [38] **Google**. Blog oficial de Google, 4-9-2009: «*Designing lean, green, energy-saving machines*». [Último acceso 7 octubre 2011, en <<http://googleblog.blogspot.com/2009/04/designing-lean-green-energy-saving.html>>.]