

Eficiencia energética de computadores personales: un análisis comparativo

Beatriz Prieto¹, Juan José Escobar¹, Juan Carlos Gómez-López¹, Antonio F. Díaz¹ y Alberto Prieto¹

Resumen -- La demanda de electricidad relacionada con las Tecnologías de la Información y la Comunicación está en constante crecimiento y contribuyendo significativamente al aumento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Para reducir este crecimiento nocivo, es necesario abordar el problema desde diferentes perspectivas. Una de ellas es implementar cambios de escala, como migrar, si es posible, algoritmos y procesos a recursos energéticamente más eficientes. En este contexto, este artículo explora la posibilidad de ejecutar programas científicos y de ingeniería en computadores personales y compara la eficiencia energética obtenida en estos dispositivos con la de computadores más potentes e incluso supercomputadores. Como anécdota, se muestra cómo la eficiencia energética obtenida para las mismas cargas de trabajo en computadores personales es similar a la de algunos supercomputadores incluidos en el ranking Green500.

Palabras clave — Eficiencia energética de computadores, Computadores personales, Medidas del consumo de energía, Ranking Green500, Test de rendimiento Linpack, Desarrollo sostenible.

1. INTRODUCCIÓN

UN informe coordinado por Victor Zhirnov, realizado en colaboración con la Semiconductor Research Corporation (SRC) y la National Science Foundation (NSF), y publicado por la Semiconductor Industry Association de EEUU, estima que mientras la producción mundial de energía crece linealmente, la demanda de electricidad de los computadores crece exponencialmente [1] [2]. En condiciones normales la cantidad mínima de energía requerida por bit se estima que es alrededor de 10-14 julios, considerando tanto los PCs portátiles como los supercomputadores. Una de las conclusiones más preocupantes del estudio es que, si se extrapola esta situación creciente del consumo producido por la gran cantidad de dispositivos existentes, éste podría exceder a la producción mundial de electricidad en 2040 [3].

Otros investigadores estiman que, en un escenario considerando el peor de los casos, las TIC consumirían en el año 2030 el 51% de la producción eléctrica, contribuyendo hasta un 23% en las

emisiones globales de gases de efecto invernadero [4] [5].

El panorama desolador indicado afortunadamente no se está cumpliendo. Este hecho lo corroboran análisis realizados en la pasada década que mostraron que el incremento de consumo bajó notablemente respecto a las previsiones citadas anteriormente, en países tales como Suecia, Alemania o EEUU [6] [7] [8] [9] [10]. Son muy notables los modelos y análisis realizados en 2015 [4] y en 2019 [11] por Andrae y Edler sobre el consumo de energía eléctrica en el ámbito de las TIC (ver Fig.1).

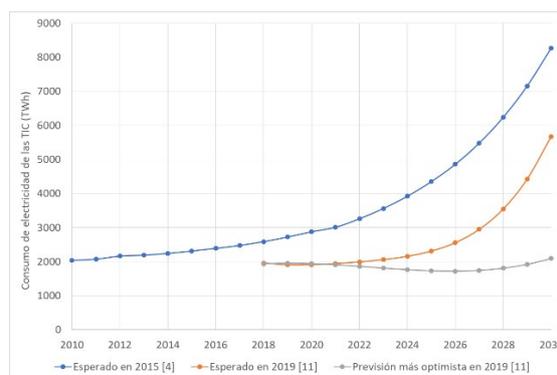


Fig. 1: Proyecciones de Andrae y Edler sobre el consumo anual de energía por las TIC (TW·h).

La reducción del incremento de consumo de energía se atribuye a diversos factores y puede llegar a ser extremadamente positivo como se indica en la Fig. 1, si se intensifican adecuadamente. Los factores fundamentales son [9], [12]:

- Mejoras en la gestión de sistemas y de centros de datos, encaminadas a optimizar la eficiencia energética. Por ejemplo, como se sugiere en [13], procurar desconectar o poner en modo de bajo consumo todos los equipos que no se estén utilizando en un momento dado.
- Adopción generalizada de tecnologías más eficientes. Un ejemplo de ello es el cambio de la tecnología de discos magnéticos (HDD) a discos

¹Grupo EFFICOMP. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, CITIC, Universidad de Granada. España. {beap, jjescobar.goloj, afdiaz, aprieto}@ugr.es

de estado sólido (SDD), lo que ha permitido una importante reducción del consumo de soportes de memorización de datos masivos. También se buscan tecnologías más eficientes para reducir el impacto ambiental en las fases de diseño y fabricación de equipamientos TIC [14].

- Cambios de escala. Un claro ejemplo es la unificación o transformación de centros de datos pequeños o medianos en otros mucho mayores que podrían denominarse centros de hiperescala (como Google Cloud, Amazon Web Services, Microsoft Azure, OVHCloud, u Rackspace Open Cloud). En los centros hiperescala el consumo de energía se puede gestionar mucho mejor. Uno de los factores más importantes en el consumo de energía de los centros de datos es el aire acondicionado, y es rentable reubicar los centros de hiperescala en lugares donde las condiciones climáticas son más favorables. Por ejemplo, uno de los centros de datos más grandes de Google se encuentra en Finlandia, donde, al ser un país nórdico (muy frío), el coste de la climatización es mucho más bajo que en países más cálidos. Este centro utiliza el agua del gélido mar del golfo de Finlandia para refrigerar todas sus instalaciones [15]. Este concepto también incluye propuestas para centros de datos autónomos energéticamente [16].

En relación con los cambios de escala, la proliferación de teléfonos inteligentes y otros dispositivos móviles pequeños también está provocando una reducción del consumo energético ya que cada uno de ellos ofrece multitud de funciones y servicios que antes realizaban dispositivos de consumo independientes (calculadoras, teléfonos, despertadores, planificadores, etc.), y que ahora efectúan un único dispositivo diseñado para optimizar el consumo de energía [6].

Hay investigadores que afirman la existencia de una tendencia en la que la proporción de consumo de electricidad de los dispositivos de consumo está disminuyendo al estar transfiriéndose sus funciones a redes y centros de datos [4]. Por otra parte, un sistema distribuido puede incluir computadores de alto rendimiento, como servidores, computadores personales y hasta pequeños nodos en una red de sensores. Evidentemente, se logra un menor consumo si la ejecución de los algoritmos se asigna a los recursos más eficientes energéticamente, aunque sea a costa de incrementar en lo posible los tiempos de ejecución [17].

Entre los recursos disponibles para computación se encuentran los computadores personales (PC), que incluyen portátiles (laptops o notebooks), computadores de sobremesa y estaciones de trabajo.

Los PCs han mejorado considerablemente su rendimiento de procesamiento y pueden ser, como se

analiza en este trabajo, competitivos desde el punto de vista energético con servidores e incluso con computadores de alto rendimiento para las mismas cargas de trabajo. Hay aplicaciones que hace unas décadas sólo se podían ejecutar en servidores o clústeres, pero que ahora se pueden ejecutar en PCs y, aunque la diferencia de tiempos de ejecución sigue siendo extraordinaria, su eficiencia energética, como se prueba en el presente trabajo, es mejor.

También hay que tener en cuenta que existen problemas de cálculo complejos que necesitan ser ejecutados en computadores portátiles y resulta interesante analizar el comportamiento de estos sistemas relacionando su rendimiento de ejecución con su consumo energético. Un ejemplo de esta situación se presenta en algunas aplicaciones biomédicas que necesitan ser realizadas con equipos móviles, como es el caso de la genómica, donde, por ejemplo, frecuentemente se necesitan pruebas de Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) en tiempo real y que se implementan en PCs portátiles [18] [19].

El presente trabajo trata de analizar la eficiencia energética de distintos computadores personales. El objetivo es mostrar cómo trasladar la ejecución de aplicaciones científico-técnicas a computadores más pequeños, como los PCs, puede contribuir a la reducción global del consumo energético. Evidentemente, para realizar esta migración, además de considerar el rendimiento energético, hay que tener en cuenta si el incremento de los tiempos de ejecución es permisible.

Con este objetivo, este trabajo se centra en presentar un estudio comparativo del parámetro de eficiencia energética (Sección II) medido con las herramientas que se indican en la Sección III, entre los cinco sistemas cuyas características se dan en la Sección IV. En la Sección V se describe y justifica la metodología utilizada para la realización de las medidas y obtención de los resultados que son mostrados en la Sección VI. Estos resultados son interpretados en la Sección VII El trabajo finaliza con las conclusiones que se incluyen en la Sección VIII

II. EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética (*Power Efficiency*, PE) es un parámetro que mide el rendimiento en la ejecución de instrucciones en un determinado sistema por cada vatio de potencia energética requerido. El rendimiento se determina por medio del rendimiento máximo de ejecución (*performance rate of execution*, R_{max}) que se mide en FLOPS, de forma tal, que la eficiencia energética representa los FLOPS que puede ejecutar el sistema por vatio; es decir:

$$PE = \frac{R_{max}}{P_{avr}} \quad (1)$$

Donde P_{avr} representa la potencia media de la energía eléctrica suministrada al sistema durante la ejecución de las instrucciones que se ejecutan en un segundo.

III. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

3.1 Medida del rendimiento de ejecución.

Para medir el rendimiento de ejecución, con objeto de efectuar el análisis comparativo, se ha utilizado el LINPACK, que es un benchmark o programa de referencia usado tradicionalmente para evaluar las prestaciones de la CPU (velocidad de computación). Este benchmark se diseñó inicialmente para supercomputadores [20].

Linpack resuelve un sistema denso de ecuaciones lineales ($A \cdot x = b$), mide el tiempo de ejecución para factorizar y resolver el sistema, y usa pivotación parcial para garantizar precisión. A partir del tiempo medido, obtiene el valor del rendimiento de ejecución en millones de instrucciones con números reales (punto flotante) ejecutadas por segundo (MFLOPS).

En el presente trabajo se utiliza el programa Linpack Xtreme desarrollado para Windows 10, 8, 7 (32 bits y 64 bits), versión v1.1.5 del 31 de diciembre de 2020 [21]. Fue ideado por Intel y se fundamenta en la compilación de Linpack Intel Math Kernel Library Benchmarks (2018.3.011). A través de una interfaz interactiva se pueden ajustar diversos parámetros y visualizar los resultados. Entre otros parámetros, es posible establecer el número de ecuaciones a resolver en la ejecución:

- $N = 15.000$ ecuaciones lineales (rápido, prueba de 2 GB),
- $N = 20.000$ ecuaciones lineales (estándar, prueba de 2 GB) o
- $N = 32.000$ ecuaciones lineales (ampliado, prueba de 8 GB).

3.2 Medida del consumo de energía global

Para medir el consumo global de energía en este trabajo se utiliza un medidor inteligente externo denominado openZmeter (abreviadamente, oZm). Existe una gran cantidad de medidores inteligentes de energía y en varios artículos se muestran estudios comparativos entre ellos [22]. Aquí se utiliza el oZm debido a que cubre los requisitos que se necesitan, a su bajo coste,

Con el oZm los parámetros se visualizan cómodamente a través de una interfaz SCADA, accesible a través de web. Los datos son almacenados en una base de datos SQL (PostgreSQL) ubicada en el propio oZm. Las medidas almacenadas pueden ser

procesadas para realizar acciones tales como obtención de máximos, mínimos y valores medios de la tensión, corriente y potencia, usando diferentes escalas de agregación (minutos, horas, días, etc.). Las medidas, formas de onda y resultados pueden ser visualizados en tiempo real a través de una interfaz gráfica diseñada específicamente para el oZm o ser exportados en formato CSV. Para más detalles, ver [23].

3.3 Medidas de los consumos internos de energía.

Para poder medir el consumo energético con una granularidad fina, se utiliza la herramienta de monitorización Intel Power Gadget que se basa en la interfaz RAPL (*Running Average Power Limit*) introducida por Intel en su arquitectura de procesadores Sandy Bridge.

La interfaz RAPL se fundamenta en la utilización de unos registros-contadores (MSR, *Model-Specific Register, MSR*) accesibles desde el lenguaje máquina que almacenan datos generados por el hardware con los que es posible monitorizar el consumo de potencia durante la ejecución del programa y seleccionar o alterar ciertas características del procesador.

De esta forma, RAPL permite medir el consumo de energía con una granularidad muy fina y con una frecuencia de muestreo alta, así como limitar el consumo de energía promedio de los diferentes componentes dentro del procesador, lo que evita que la temperatura del procesador alcance un valor indeseable. RAPL considera diferentes zonas o dominios de consumo de energía (PKG, PPO, PP1, DRAM y PSys) tal como se muestra en la Fig. 2 [24].

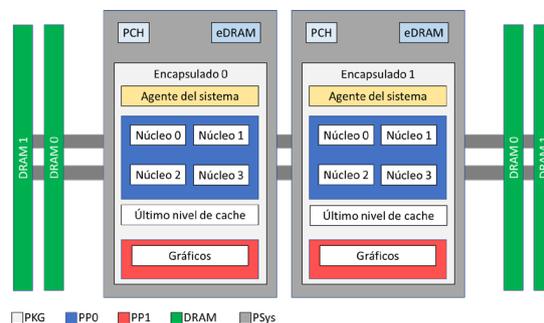


Fig. 2. Dominios de potencia considerados en la interfaz RAPL.

IV. PLATAFORMAS Y PROCESADORES BAJO PRUEBA

La Tabla I muestra las características de los cinco sistemas bajo prueba (SBP). Se han seleccionado cuatro portátiles y un sistema de sobremesa (HP Pavilion), todos ellos con sistema operativo Windows. Estos equipos fueron adquiridos a lo largo de los años, por lo que los resultados permiten conocer la evolución del rendimiento a lo largo del tiempo.

Tabla I: Características de los Sistemas Bajo Prueba (SBP).

	SBP1	SBP2	SBP3	SBP4	SBP5
Referencia:	Sony Vaio SVZ1311C5E	ASUS Notebook X550J	Toshiba Portege Z30-C	HP Pavilion All-in-One K1987LF	ASUS Expertbook B9400CEA
Procesador:	Core i5-3210M 2,5GHz	Core i5-4200H 2,8 GHz	Core i7-6500U 2,5 GHz	Core i5-10400T 2 GHz	Core i7-1165G7 2,8 GHz
Núcleos, hebras:	2 núcleos, 4 hebras	2 núcleos, 4 hebras	2 núcleos, 4 hebras	6 núcleos, 12 hebras	4 núcleos, 8 hebras
Capacidad de memoria:	8 GB	8 GB	16 GB	16 GB	16 GB
Memoria masiva:	SSD 256 GB	HDD 500 GB	SSD 1 TB		SSD 1 TB
Placa base:	SONY VAIO	ASUS X550J	TOSHIBA	HP 86ED	ASUS Tek
Recursos gráficos:	Intel HD Graphics 4000	NVIDIA GeForce GTX 850M	Intel HD Graphics 520	UHD Graphics 630	Intel Iris Xe
Adaptador AC/DC:	Out: 19,5V - 33mA. In: 100-240V - 1,5A	Out: 19V - 6,32 A. In: 100-240V - 6,32 A	Out: 19,5V - 2,37A. In: 100-240V-1,2A	Out: 19,5 V - 7,7 A. In: 100-240 V - 2,5 A	Out: 5-15V 3A. In: 100-240V - 1,5A
Sistema Operativo	Windows 10 Home	Windows 10 Pro	Windows 10 home	Windows 10 Home	Windows 10 Pro
Otras características del procesador:					
Generación:	3ª	4ª	6ª	10ª	11ª
Litografía:	22 nm	22 nm	14 nm	14 nm	10 nm
Frecuencia:	2,5 - 3,10 GHz	2,8 - 3,4 GHz	2,5 - 3,10 GHz	2 - 3,6 GHz	4,7 GHz
Tamaño de caché:	3 MB	3 MB	4 MB	12 MB	12 MB
Capacidad máx. memoria:	32 GB	32 GB	32 GB	128 GB	64 GB
Comercialización del procesador:	Q2, 2012	Q4, 2013	Q3, 2015	Q2, 2020	Q3, 2020
TDP:	35 W	47 W	15 W	25 W	12 W
T_{Junction} :	105°C	100°C	100°C	100°C	100°C

En la tabla, TDP se refiere a la potencia promedio (vatios, W) disipada por el procesador cuando opera a la frecuencia base con todos los núcleos activos bajo una carga de trabajo de alta intensidad, definida por Intel; y T_{Junction} es la temperatura máxima permitida en la matriz del procesador. Se pueden encontrar más detalles de estos procesadores en [25].

V. METODOLOGÍA

Según se indicó en la Sección II, la eficiencia energética (PE) en la ejecución de un programa se puede determinar calculando el cociente del rendimiento máximo de ejecución (*performance rate of execution*, R_{max}) de ese programa, entre la potencia media disipada durante la ejecución del mismo.

Para hacer estas medidas, y obtener otros parámetros de interés, se ha ejecutado en cada uno de los sistemas bajo prueba el programa de referencia (Linpack Extreme), y simultáneamente se han tomado y almacenado medidas con el Intel Power Gadget y con el oZm. Los resultados obtenidos en ambas aplicaciones se sincronizan en el tiempo, se

visualizan gráficamente, y se calculan los valores medios, las desviaciones estándar, etc.

Con objeto de tener resultados más fiables, las ejecuciones del Linpack en cada sistema se repiten cinco veces consecutivas, existiendo unos periodos de tiempo entre las ejecuciones del programa en que éste está inactivo. Las tablas y gráficas que se muestran en la Sección VI corresponden a los valores medios y desviaciones estándar de las cinco mediciones.

Las ejecuciones de Linpack se han realizado en multiprogramación, en concurrencia con el sistema operativo y otros programas de servicio del sistema. En un intento de obtener una estimación de las magnitudes específicamente atribuibles a la ejecución del Linpack, se han identificado los intervalos de tiempo en los que se está ejecutando, “fases esenciales” (“core” fases), y en los que no es así, pero el sistema está listo para iniciar una nueva ejecución, “fases inactivas” (“baseline” o “idle” fases) [26]. Es conveniente aclarar que las fases de inactividad no son un estado de suspensión o hibernación.

Los sistemas bajo prueba en este trabajo ejecutan los programas sin necesidad de ningún sistema de aire acondicionado externo, a diferencia de los grandes computadores que requieren equipos de enfriamiento costosos que consumen una gran cantidad de energía, la cual también debe ser medida para obtener un valor correcto de la eficiencia energética.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Tabla II presenta un resumen de los resultados obtenidos durante la ejecución del Linpack en los cinco sistemas bajo test. Únicamente se muestran los parámetros generados que son de interés desde el punto de vista del presente trabajo; es decir los relacionados con el consumo energético y con la potencia de computo (rendimiento de ejecución). En

la parte superior se muestran los resultados obtenidos por el Linpack Extreme, proporcionando la tasa de rendimiento de ejecución. Después los facilitados por el Intel Power Gadget, que incluyen la potencia media en el dominio del procesador (UC + ALU + FPU + GT + otros circuitos en el chip), en el dominio IA (UC + ALU + FPU), dominio gráfico (GT) y dominio de memoria (DRAM) (Fig. 2). Obsérvese que no se obtienen medidas del consumo de otros subsistemas tales como buses, discos, puertos de E/S y dispositivos internos de refrigeración (ventiladores). Al final de la tabla se incluyen los tiempos medios de ejecución y la potencia media global consumida (que considera el consumo de la totalidad de subsistemas) medidos con el oZm.

Tabla II: Resumen de los principales resultados obtenidos en los cinco sistemas bajo prueba

Sistemas bajo prueba →	SBP1	SBP2	SBP3	SBP4	SBP5
Resultados del Linpack Extreme:					
Nº de CPUs	1	1	1	1	1
Nº de núcleos	2	2	2	6	4
Nº de hebras usadas	2	2	2	6	4
Nº de pruebas en serie	5	5	5	5	5
Nº de ecuaciones resueltas	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Valor de alineamiento de datos (KB)	4	4	4	4	4
Tiempo de una ejecución	164,29 ± 4,42	72,9 ± 1,58	85,45 ± 3,40	48,19 ± 0,80	40,01 ± 2,29
R medio (GFlops)	32,1 ± 0,83	73,17 ± 1,56	62,50 ± 2,36	110,71 ± 1,80	133,71 ± 8,27
R máximo (GFlops)	32,64	74,64	63,92	112,23	148,47
Resultados del Intel Power Gadget:					
RDTSC (nº de ciclos)	1,22E+12	1,94E+11	2,19E+11	9,20E+10	1,12E+11
Tiempo de una ejecución (s)	158,01 ± 19,05	69,61 ± 2,58	84,4 ± 3,3	46,17 ± 0,7	39,90 ± 2,17
Frecuencia de la CPU (GHz)	2.882	3.390	2.486	3.281	3.281
% de utilización de la CPU	75,15 ± 1,64	69,61 ± 2,58	57,54 ± 3,08	51,12 ± 1,04	51,45 ± 0,51
Potencia del procesador (W)	19,85 ± 0,06	37,59 ± 0,25	15,55 ± 0,17	30,03 ± 0,06	21,22 ± 1,94
Potencia IA (W)	16,99 ± 0,05	27,68 ± 0,35	10,31 ± 3,29	29,19 ± 0,06	16,84 ± 2,02
Potencia GT (W)	0,0203 ± 0,0003	2,33 ± 0,09	0,007 ± 0,002	2,33 ± 0,09	0,0118 ± 0,0004
Potencia DRAM (W)	---	3,353 ± 0,005	2,66 ± 0,40	2,825 ± 0,007	0
Temperatura de la capsula (°C)	82,94 ± 0,49	96,13 ± 0,88	70,75 ± 6,08	64,39 ± 2,45	82,05 ± 1,05
Resultados del openZmeter:					
Potencia activa (P_{avg}) (W)	45,94 ± 1,12	35,95 ± 1,06	93,42 ± 0,80	68,72 ± 1,54	33,42 ± 2,41
Tiempo de una ejecución (s)	166,28 ± 4,20	85,45 ± 3,40	72,92 ± 1,58	48,19 ± 0,80	39,9 ± 2,17

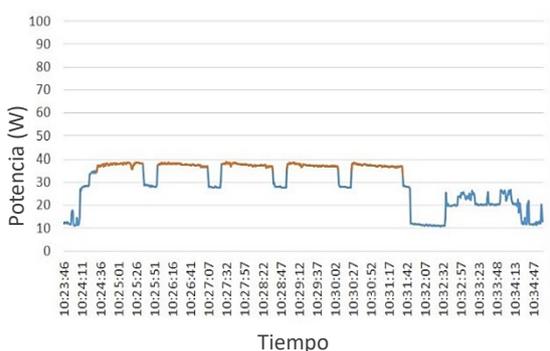
También, para cada uno de los equipos de prueba, se han estimado los consumos de potencia y otros parámetros en las fases inactivas calculando los valores medios en los intervalos de tiempo en los que el Linpack no está en ejecución. Estos valores medios son considerados como constantes del sistema o valores de referencia de cuando la carga de trabajo de procesamiento en análisis no está siendo ejecutada.

En la Tabla III, como ejemplo de los resultados obtenidos para los cinco sistemas bajo prueba, se muestran los de uno de ellos (el SBP2). También, para el análisis efectuado, se han considerado las formas de onda de las señales de consumo de potencia, mostrándose en la Fig. 3 las obtenidas para el SBP2, con los resultados tanto del Linpack como del oZm.

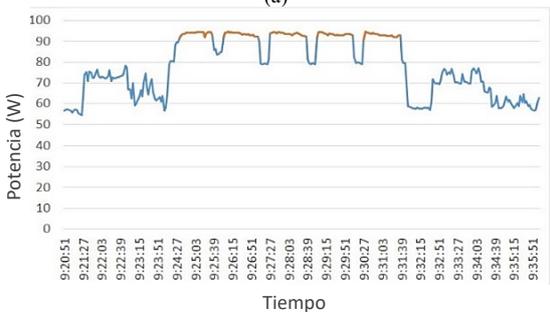
En estas gráficas las fases esenciales se muestran en color rojo y el resto corresponde a las fases inactivas.

Tabla III: Resultados del sistema de prueba SBP2 mostrando los parámetros en las fases esenciales e inactivas.

SBP2 (ASUS Notebook)		Total en la fase esencial	Total en la fase inactiva	Atribuible al Linpack
Medidas del Intel Power Gadget	% de utilización de la CPU	69,61 ± 2,58	15,63 ± 1,61	53,98
	Potencia del dominio del procesador (W)	37,59 ± 0,25	24,98 ± 5,16	12,61
	Potencia del dominio IA (W)	27,68 ± 0,35	15,05 ± 3,82	12,63
	Potencia del dominio GT (W)	2,33 ± 0,09	2,7 ± 0,31	-0,37
	Potencia del dominio DRAM (W)	3,353 ± 0,005	1,88 ± 0,10	1,473
Medidas del oZm	Temp. encapsulado (°C)	96,13 ± 0,88	85,37 ± 5,73	10,76
Medidas del oZm	Potencia activa	93,42 ± 0,80	58,53 ± 12,08	34,89



(a)



(b)

Fig. 3: Variaciones de potencia (vatios) con respecto al tiempo (h:m:s) en el SBP2: (a) Gráfica con datos de Power Intel Gadget, (b) Gráfica con medidas del oZm

VII. DISCUSIÓN

Como se ha comentado anteriormente, la eficiencia energética (PE) se utiliza para comparar el consumo de energía en relación con la potencia. Este es un parámetro ampliamente utilizado en la comunidad y, en particular, en el ranking Green500, publicado semestralmente que clasifica los supercomputadores incluidos en el TOP500 según su eficiencia energética [27] [28].

En cuanto al Green500, las mediciones de potencia o consumo de energía se realizan en múltiples ubicaciones en paralelo en todo el sistema informático. Dichas ubicaciones son, por ejemplo, las entradas de cada uno de los bastidores (armarios

individuales) o los conectores de salida de los distintos transformadores del edificio que alimentan al centro de datos [29].

En este trabajo, para obtener la eficiencia energética de los sistemas de prueba, en primer lugar, se ha utilizado, al igual que se hace en el Green500, el valor R_{max} generado por Linpack. Por otra parte, la potencia promedio del consumo eléctrico total del sistema se hace a partir de las medidas del oZm De esta forma, considerando los datos de la Tabla II, se obtienen los resultados que se muestran en la última columna de la Tabla IV.

Tabla IV: Eficiencia energética para los cinco sistemas bajo prueba.

Plataforma	$R_{average}$ (GFLOPS)	R_{max} (GFLOPS)	Potencia (W)	Energía consumida en una ejecución del Linpack (Wh)	Eficiencia energética (GFLOPS/W)
SBP1, SONY Vaio	32,1	32,64	45,94	2,12	0,71
SBP2, ASUS Notebook	73,17	74,64	93,42	1,89	0,80
SUT3, Toshiba Portege	62,5	63,92	35,95	0,85	1,78
SUT4, HP Pavilion	110,71	112,23	68,72	0,92	1,63
SUT5, ASUS Experbook	133,71	148,47	33,47	0,37	4,44

La Fig. 4 muestra en un gráfico de barras la energía consumida y la eficiencia energética calculada.

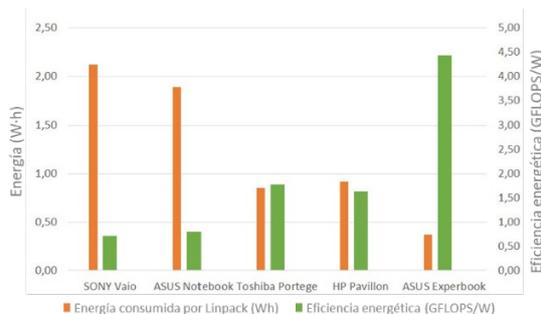


Fig. 4: Energía total consumida y eficiencia energética durante el procesamiento del Linpack en los cinco sistemas de prueba.

Un dato proporcionado por el Intel Power Gadget es el consumo energético específico del procesador (CPU) (ver Tabla II), que se puede combinar con la tasa máxima de ejecución (R_{max}) obtenida con el Linpack, y así calcular la eficiencia energética a nivel del procesador. Los resultados se muestran en la Fig. 5. Como se puede observar, las generaciones más recientes de procesadores muestran un mayor rendimiento de ejecución. Sin embargo, la eficiencia energética no mejora sustancialmente hasta el último equipo, ya que ha sido en los últimos años cuando ha crecido el interés de los fabricantes por diseñar microprocesadores que mejoren no sólo el rendimiento computacional sino también la eficiencia energética.

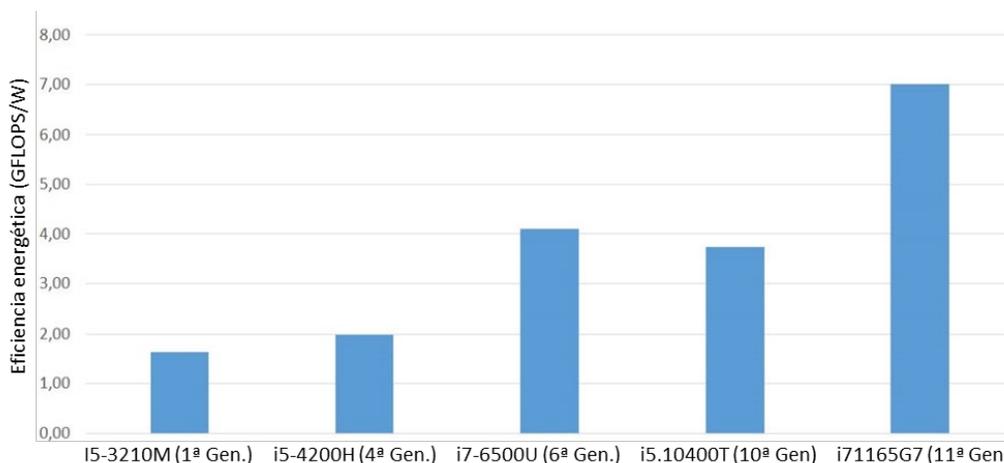


Fig. 5: Eficiencia energética de los cinco microprocesadores medida con el procesamiento del Linpack.

Tabla V. Posiciones de los sistemas bajo prueba dentro del Green500, en función de la eficiencia energética [30].

Green 500	Top 500	Nombre	Rmax TFlops	Power (KW)	Power Efficiency (GFlops/W)
1°	301°	MN-3	2.181,20	55,39	39,38
2°	291°	SSC-21 Scalable	2.274,10	103,01	33,98
		Etc.			
78°	160°	Numerical Materials	3.082,12	691,20	4,46
		SBP5.	0.148	0.033	4.440
79°	113°	Joliot-Curie Skl	4.065,55	917,00	4,43
		Etc.			
155°	252°	Miri	2.395,68	1.359,38	1,76
		SBP2.	0.064	0.036	1.780
156°	251°	Nuri	2.395,68	1.359,38	1,76
		Etc.			
161°	408°	JCSytem	1.807,00	1.100,00	1,64
		SUT4. HP	0.112	0.069	1.633
162°	355°	HKVDPSytem	1.979,00	1.216,00	1,63
		Etc.			
170°	415°	Sugon TC6000	1.765,00	1.320,00	1,34
172°	93°	Pangea	5.283,11	4.150,00	1,27
		SBP3.	0.075	0.093	0.799
		SBP1.	0.036	0.046	0.792
173°	156°	Thunder	3.126,24	4.819,50	0,65
		Etc.			

Como curiosidad, la Tabla V compara la eficiencia energética de los pequeños sistemas analizados con los supercomputadores Green500 (noviembre 2021). Se incluye información sobre la posición de cada plataforma en el Green500 y en el Top500, y también se muestra el rendimiento de ejecución, la potencia promedio consumida y la eficiencia energética. Las medidas se han obtenido en todos los casos con el Linpack. Se han agregado a la tabla las filas correspondientes a las posiciones que ocuparían los equipos de prueba dentro de esa clasificación.

Como se puede observar, los equipos bajo prueba obtienen una mayor eficiencia energética que algunos

de los supercomputadores del Green500. Es importante señalar que, en todos los casos, el rendimiento de ejecución (R) de los supercomputadores es extraordinariamente más alto que el de los sistemas bajo prueba. Así, por ejemplo, aunque el SBP5 es más eficiente energéticamente que el Joliot-Curie SKL (4,44 frente a 4,43 GFLOPS/W), un programa que tardase 1 segundo en ejecutarse en el supercomputador, en el SBP5 tardaría:

$$t_{SBP5} = \frac{R_{SKL}}{R_{SBP5}} = \frac{4,065,6}{0,148} = 27,470 s = 7 \text{ horas}, 37 \text{ minutos}, 50,27 \text{ segundos} \quad (2)$$

La energía consumida en un computador por la ejecución de NI instrucciones en punto flotante se puede obtener fácilmente a partir de la eficiencia energética, PE . En efecto, de acuerdo con la definición de eficiencia energética se verifica:

$$PE = \frac{\frac{NI}{t}}{P} = \frac{NI}{P \cdot t} \quad (3)$$

donde t es el tiempo en que tardan en ejecutarse las NI instrucciones y P es la potencia media consumida.

Teniendo en cuenta la ecuación anterior y que la energía consumida, E , es el producto de la potencia por el tiempo, se verifica:

$$E = P \cdot t = \frac{NI}{PE} \quad (4)$$

Es decir, la energía total consumida durante la ejecución de las NI instrucciones es menor si la eficiencia energética también lo es, independientemente del tiempo de ejecución de dichas instrucciones.

VIII. CONCLUSIONES

En este artículo se han explorado las posibilidades de utilizar computadores personales como una opción energéticamente plausible para la ejecución de programas informáticos científicos y de ingeniería no muy complejos. Para ello, se han utilizado cinco computadores personales con diferentes procesadores

de distintas generaciones, y se han calculado medidas de rendimiento de ejecución, energía eléctrica consumida y eficiencia energética de los cinco sistemas sometidos a prueba.

Como programa de referencia para las medidas se ha utilizado el programa Linpack. Este programa es considerado como un punto de referencia muy adecuado para medir el rendimiento de ejecución de equipos que ejecutan instrucciones con datos en coma flotante, que es el tipo de datos más complejo desde el punto de vista computacional, que requiere tiempos de procesamiento rápidos y es representativo de las aplicaciones científicas y de ingeniería.

Considerando el Green500 (noviembre de 2021), que clasifica los supercomputadores TOP500 según su eficiencia energética, los computadores personales analizados ocuparían las posiciones 79, 155, 162, 173 y 174, respectivamente. El hecho de que un sistema tenga una mayor eficiencia energética significa que consume menos energía ($W\cdot h$) ejecutando el mismo programa, independientemente del tiempo de ejecución.

Se concluye que la eficiencia energética de los computadores personales para la misma carga de trabajo es comparable a la de los computadores más potentes, lo que significa que, en aquellos casos donde el tiempo de ejecución no es un requisito, se podría plantear la opción de migrar la ejecución del programa de equipos más potentes (como servidores o estaciones de trabajo) a computadores personales con objeto de contribuir a reducir el consumo energético global producido por las TIC.

Conviene recordar que predicciones de 2019 estimaban que, en el peor de los casos, el consumo de electricidad por las TIC podría llegar a ser más de la mitad (51%) de la demanda total del planeta [11]. Por este motivo, es necesario analizar diferentes opciones, como se hace en este trabajo, para reducir la contribución de las TIC al impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Francisco Illeras (del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada) y a Francisco Gil (de la Universidad de Almería) su valiosa colaboración en este trabajo, que ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU) junto con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), proyecto PGC2018-098813-B-C31.

REFERENCIAS

- [1] El Confidencial. *A solution is being sought to an announced crisis*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-08-30/energia-maquinas-electricidad-crisis-energetica_1251881/, 2016 (accessed 31 January 2022).
- [2] *Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call to Action*. <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/RITR-WEB-version-FINAL.pdf>, 2015 (accessed 13 January 2022).
- [3] Burgess, A., Brown, T; *By 2040 there may not be enough power for all our computers*, *Manufacturer*, <https://www.themanufacturer.com/articles/by-2040-there-may-not-be-enough-power-for-all-our-computers/>, 17 Aug 2016 (accessed 31 January 2022).
- [4] Andrae, A.S., Edler. T. *"On global electricity usage of communication technology: trends to 2030."* *Challenges* 6.1 (2015): 117-157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>.
- [5] Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G., Friday, A. *The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations*. arXiv preprint arXiv:2102.02622. (2022).
- [6] Malmodin, J., Lundén, D., *"The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015."* *Sustainability* 10.9 (2018). <https://doi.org/10.3390/su10093027>.
- [7] «Federal Ministry for Economic Affairs. *Development of ICT-Related Electricity Demand in Germany* (Report in German). 2015. <https://www.bmwi.de/Navigation/DE/Home/home.html>»
- [8] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. *Information and communication technologies consume 15%* ... <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2015/20151210-gabriel-studie-strombedarf-ikt.html> (2015) (accessed 31 January 2022).
- [9] Shehabi, A. et al. *United States Data Center Energy Usage Report*. 2016. Berkeley Lab <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>.
- [10] Urban, B., et al. *Energy Consumption of Consumer Electronics in U.S. Report to the CEA*; Boston, MA, USA, 2014. <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/electronics.pdf>.
- [11] Andrae, AS. *"Comparison of several simplistic high-level approaches for estimating the global energy and electricity use of ICT networks and data centers."* *International Journal* 5 (2019): 51. DOI: 10.30634/2414-2077.2019.05.06.
- [12] Manganelli, M., et al. *"Strategies for Improving the Sustainability of Data Centers via Energy Mix, Energy Conservation, and Circular Energy."* *Sustainability* 13.11 (2021): 6114. <https://doi.org/10.3390/su13116114>.
- [13] Hamdi, N., Walid C., *"A survey on energy aware VM consolidation strategies."* *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 23 (2019): 80-87. DOI: 10.1145/3123779.3123807.
- [14] Bordage, F. *The environmental footprint of the digital world*, *GreenIT* 20, https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/11/GREENIT_EENM_etude_EN_accessible.pdf. 2020. (accessed 31 January 2022).

- [15] Google Data Centers. Hamina, Finland. *A white surprise*. <https://www.google.com/about/datacenters/locations/hamina/> 2022 (accessed 2022).
- [16] Landré, D., Nicod, J-M., Christophe V., "Optimal standalone data center renewable power supply using an offline optimization approach." *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 34 (2022): 100627.
- [17] Asadi, A.N., et al., "Analytical evaluation of resource allocation algorithms and process migration methods in virtualized systems." *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 25 (2020): 100370. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.100370>.
- [18] ThermoFisher Scientific. *StepOne Real-Time PCR System*, laptop. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/4376373> (accessed 31 January 2022).
- [19] BioTeke. *Ultra-fast portable PCR machine*. <https://www.bioteke.cn/4-channel-rapid-POC-Ultra-fast-portable-PCR-machine-pd04043964.html> (accessed 31 January 2022).
- [20] *Top500, The Linpack Benchmark*, <https://www.top500.org/project/linpack/> (accessed 31 January 2022).
- [21] *Linpack Xtreme, TechPowerUp, December 31st, 2020 version*. <https://www.techpowerup.com/download/linpack-xtreme/> (accessed 31 January 2022).
- [22] Viciano, E., et al. "OpenZmeter: An efficient low-cost energy smart meter and power quality analyzer." *Sustainability* 10.11 (2018), DOI:10.3390/su10114038.
- [23] *What is openZmeter?*. <https://openzmeter.com/> (accessed 31 January 2022).
- [24] Intel, I. A. "Intel Arch. Soft. Develop. Manual Vol. 3, pp. 14-31 to 14-39." <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/64-ia-32-architectures-software-developer-system-programming-manual-325384.html> (accessed 31 January 2022).
- [25] *Intel Processors for All That You Do*. Online: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors.html> (accessed 31 January 2022).
- [26] Meuer, H., et al. "The Top500 project." <http://www.top500.org/lists/2010/06> (2010). (accessed 31 January 2022).
- [27] Feng, W. C., Cameron, K., "The green500 list: Encouraging sustainable supercomputing." *Computer* 40.12 (2007): 50-55. <https://doi.org/10.1109/mc.2007.445>.
- [28] *TOP500. The list. Oline*: <https://www.top500.org/lists/green500/> (accessed 31 January 2022).
- [29] EEHPC, *Energy Efficient High Performance Computing Power Measurement Methodology* (version 2.0 RC 1.0). Energy Efficient High Performance Computing Working Group (EEHPC WG), Vols. 1 de %2https://www.top500.org/static/media/uploads/methodology-2.0rc1.pdf.
- [30] *Green500 List November 2021*. Online: <https://www.top500.org/lists/green500/list/2021/11/> (accessed 31 January 2022).
- [31] *European Commission, 2030 climate & energy framework*. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en (accessed 30 January 2022).
- [32] Hernandez, W., et al. "A method of verifying the statistical performance of electronic circuits designed to analyze the power quality." *Measurement* 93 (2016): 21-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.061>.
- [33] Weaver, V.M., et al. "Measuring energy and power with PAPI." 41st international conference on parallel processing workshops. IEEE, 2012. <http://dx.doi.org/10.1109/ICPPW.2012.39>.
- [34] Khan, K. N., et al., "RAPL in action: Experiences in using rapl for power measurements." *ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems (TOMPECS)* 3.2 (2018): 1-26. DOI: 10.30634/2414-2077.2019.05.06.