



Sostenibilidad energética en Centros de Datos

ALBERTO PRIETO ESPINOSA

Profesor Emérito del Departamento de Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica (Univ. de Granada)

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Informática y de Telecomunicación
Universidad de Granada
18 de mayo 2024



Google Developers Students Club
(Dylofest 2024)



1

Sostenibilidad energética en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones



- 1. Contribución de la informática y las comunicaciones digitales al consumo energético.
- 2. Evolución del consumo energético de computación
- 3. Procedimientos y técnicas para reducir la energía requerida por las TIC
- 4. Centros de Datos energéticamente sostenibles.

A. Prieto

2



Contribución de las TIC al consumo energético

Alberto Prieto

Departamento de Ingeniería de Computadores,
Automática y Robótica.
Universidad de Granada

3

Computación sostenible o verde (Green Computing)



- Es el estudio y la práctica de **diseñar, fabricar, usar y eliminar** computadores, servidores y su hardware asociado para consumir energía de manera eficiente y efectiva con un impacto mínimo o nulo en la salud y el medio ambiente.
- Nos referiremos, en general a las **Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC)**; estas:
 - Constituyen el conjunto de herramientas, recursos y dispositivos tecnológicos que permiten la adquisición, almacenamiento, procesamiento, transmisión y presentación de información de manera digital.
 - Incluyen tecnologías como computadoras, internet, software, dispositivos móviles, redes de comunicación, y aplicaciones tan relevantes como las Inteligencia Artificial (IA), entre otras.

- Dhaini, M., Jaber, M., Fakhereldine, A., Hamdan, S., & Haraty, R. A. (2021). Green computing approaches-A survey. Informatica, 45(1)
- IBM (2022) Learn how green computing reduces energy consumption.
[https://www.ibm.com/cloud/blog/green-computing#:~:text=Green%20computing%20\(also%20known%20as,consumed%20by%20manufacturers%2C%20data%20ce](https://www.ibm.com/cloud/blog/green-computing#:~:text=Green%20computing%20(also%20known%20as,consumed%20by%20manufacturers%2C%20data%20ce)

A. Prieto

4



- La sostenibilidad en las TIC se enmarca dentro de uno de los mayores retos de la sociedad actual, consistente fundamentalmente en **reducir el consumo energético**.
- En general, la sociedad desconoce que las TIC, y en particular la IA, constituyen un ámbito relevante en el consumo de energía eléctrica, teniendo un gran impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Todos debemos participar activamente en el reto de reducirlo.
- Además de las **razones medioambientales**, reducir el consumo de energía:
 - tiene fuertes **implicaciones económicas** y
 - mejora la **autonomía** de muchos dispositivos que utilizan baterías, como teléfonos inteligentes, dispositivos móviles y elementos del Internet de las Cosas

A. Prieto

5

Previsiones del consumo de energía eléctrica (2015)

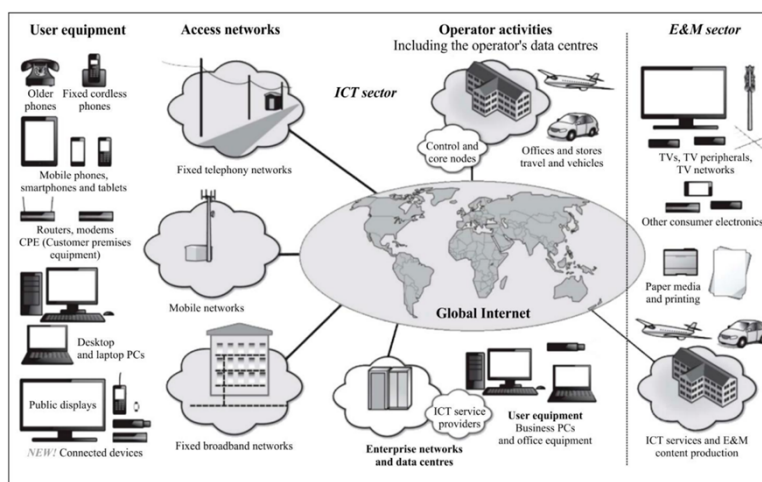


- La Asociación de la Industria de Semiconductores de EE. UU. afirma:
 - Aunque la producción mundial de energía crece linealmente, la demanda de electricidad procedente de ordenadores lo hace de forma exponencial
- En el peor de los casos, las TIC podrían contribuir hasta el **23% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero para 2030**.
- De continuar la tendencia, el consumo de energía eléctrica de la gran cantidad de equipos tecnológicos **superará la producción mundial de energía eléctrica en 2040**, no siendo suficiente, por lo tanto, para alimentar todos los computadores del mundo.

A. Prieto

6

Sectores de las TIC involucrados en el consumo de energía



Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement. International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITU-T L.1470

A. Prieto

7

Cómo afectan las TIC al medio ambiente



- Efecto directo
- Efecto indirecto
- Efecto terciario (o de rebote)

J. Desjardins. (2018). What happens in an internet minute in 2018. Visual Capitalist. <https://www.visualcapitalist.com/internetminute-2018>

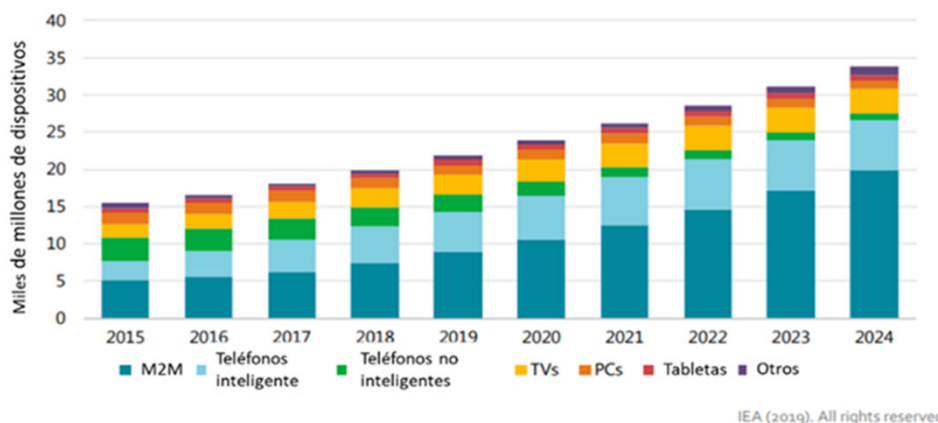
A. Prieto

8

El efecto directo, en primer lugar, es debido a:



- La gran proliferación e incremento global del número de dispositivos electrónicos, redes de transmisión y centros de datos conectados a Internet.



A. Prieto

Grafico realizado por *International Energy Agency* en base al trabajo de T. Barnett y colaboradores (2019) and Cisco (2016)

9

El efecto directo también es debido a:



- El **incremento de aplicaciones** que constantemente usamos tanto para tareas rutinarias (telefonos inteligentes, emails, social redes sociales, ...), como para programar tareas tradicionales de computación (PCs → HPC).
- La aparición de **nuevas aplicaciones** que requieren nuevos dispositivos que, aunque individualmente consumen muy poca energía, dada su enorme cantidad su contribución global al consume es muy significativa.

J. Desjardins. (2018). What happens in an internet minute in 2018. Visual Capitalist.
<https://www.visualcapitalist.com/internetminute-2018>.

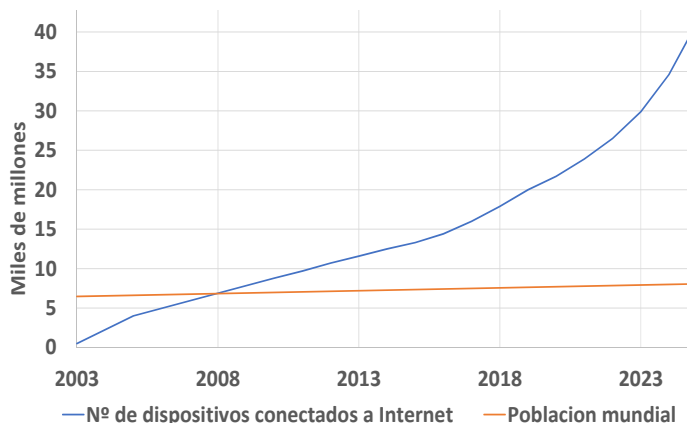
A. Prieto

10

Ejemplo de ámbito de aplicación: Internet de las Cosas (IoT)



- Se puede considerar que IoT nació cuando el número de dispositivos conectados a Internet superó el número total de habitantes de la Tierra (finales de 2008)



A. Prieto

11

Efecto indirecto



- Está provocada por aplicaciones TIC que facilitan la mejora de la eficiencia y la **reducción del consumo primario de energía** en sectores muy diversos como: construcción, industria, transporte y comercio, aportando soluciones inteligentes.
- Es bueno para el medio ambiente.**
- En otras palabras, el aumento del consumo de TIC proviene en gran medida de su **reducción en otros sectores**, moderándose, como saldo total, el consumo global.
- Objetivo:** identificar las diferentes aplicaciones TIC en la edificación, el transporte y la industria que redundan en una reducción del consumo energético.

A. Prieto

12

Según datos de la iniciativa GeSI los dominios TIC que están consiguiendo mayores volúmenes de reducción de CO2 son:



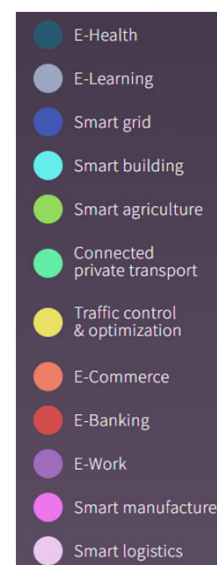
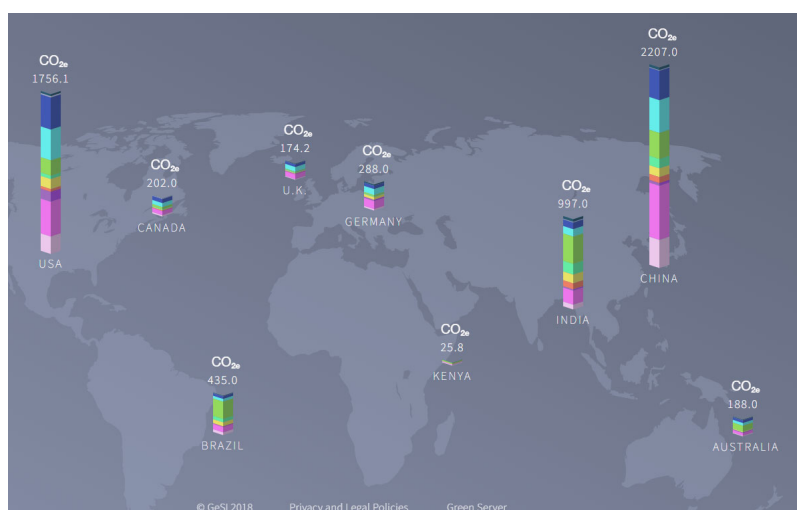
- E-salud
- E-enseñanza (clases virtuales, etc.)
- Redes eléctricas inteligentes
- Edificios inteligentes
- Agricultura inteligente
- Transporte privado interconectado
- Control y optimización de tráfico
- E-comercio (transacciones comerciales)
- E-bancario
- E-trabajo (teletrabajo)
- Fabricación inteligente
- Logística Inteligente

A. Prieto

13

Efectos indirectos: reducción de emisiones de CO2 en millones de toneladas, gracias a las TIC

- <https://smarter2030.gesi.org/explore-the-data/>



A. Prieto

14

Efecto terciario (o efecto rebote)



- Es un fenómeno que se produce a medida que los servicios TIC son más útiles, más baratos y eficientes energéticamente, ya que esto aumenta nuestro estilo de vida digital, lo que produce un efecto rebote: **los equipos** TIC consumen menos, pero **se utilizan mucho más**.
- A nivel mundial tiene una consecuencia **negativa**.
- Las estimaciones muestran que los posibles efectos rebote por la digitalización varían entre un **10% y un 30% de mayor consumo eléctrico**, dato que varía según el sector, la tecnología y el uso final.

GeSI. Global e-Sustainability Initiative. Accenture strategy SMARTer2030-ICT solutions. (2015)
https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf

A. Prieto

15

Como conclusión podemos decir que:



- Las TIC, globalmente no son solo perjudiciales para el medio ambiente, sino que, por el contrario, están contribuyendo a la mejora en distintos sectores.
- Su gran uso (nº de dispositivos y diversidad de aplicaciones) nos reporta grandes beneficios mejorando nuestra productividad y calidad de vida; pero como contrapartida tiene un efecto nocivo para el medio ambiente.
- Debe analizarse rigurosamente la evolución del consumo energético, y tomarse las medidas oportunas para contribuir a su sostenibilidad o reducción.

16

2. Evolución del consumo energético de las TIC

17

Repaso



- Energía (E): Julios
- Energía = Potencia·tiempo; E=P·t
- Energía → [julios] o [Watios·segundo]
- 1 Julio= 1W·s; 1 W·h = 3.600 julios
- Eficiencia energética (EE) en computadores (nº computaciones por julio de energía)
- FLOP: Operaciones con nº reales ("punto o coma flotante")

10 ⁿ	Prefijo	Símbolo	Equivalencia decimal
10 ¹⁸	exa	E	1 000 000 000 000 000 000
10 ¹⁵	peta	P	1 000 000 000 000 000
10 ¹²	tera	T	1 000 000 000 000
10 ⁹	giga	G	1 000 000 000
10 ⁶	mega	M	1 000 000
10 ³	kilo	k	1 000
10 ²	hecto	h	100
10 ¹	deca	da	10
10 ⁰	-	-	1

$$EE = \frac{\text{Instrucciones}}{\text{Energía}} = \frac{\text{Instrucciones/s}}{\text{Energía/s}} = \frac{\text{Instrucciones/s}}{\text{Vatio}} = \frac{\text{FLOP/s}}{W}$$

A. Prieto

18

Evolución y previsiones de consumo

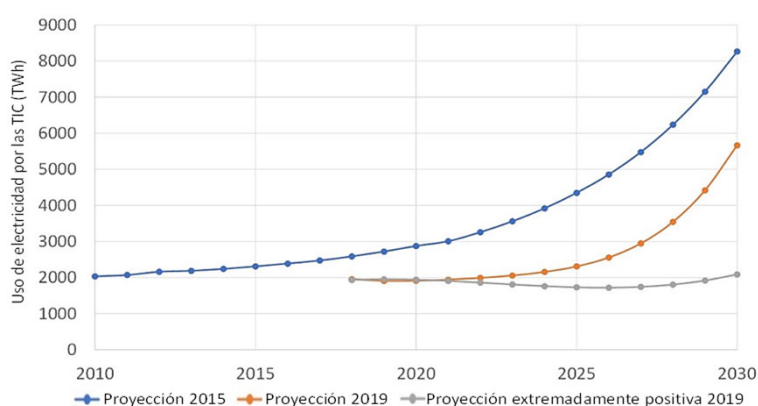


- En general, las previsiones sobre el incremento del consumo energético de las TIC realizadas hace dos décadas eran excesivamente pesimistas, pero han servido para crear conciencia en las comunidades científica y tecnológica sobre el problema.
- No eran rigurosas ya que partían de hipótesis muy parciales como, en algún caso considerar, sin más, que el consumo crece proporcionalmente con el número de dispositivos, usuarios o tráfico de datos; obviando incluir otros parámetros como que la eficiencia energética de estos dispositivos es cada vez mejor.

A. Prieto

19

Proyecciones de Andrae and Edler sobre el uso de energía eléctrica por las TIC en TW·h por año (2015 y 2019)



- A.S. Andrae y T. Edler. (2015). On global electricity usage of communication technology: trends to 2030. Challenges, 6(1), 117-157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- A.S. Andrae (2019). Comparison of several simplistic high-level approaches for estimating the global energy and electricity use of ICT networks and data centers. International Journal, 5, 51. DOI: 10.30634/2414-2077.2019.05.06

A. Prieto

20

Para medir el consumo energético por bit, por lo general se mide o estima:

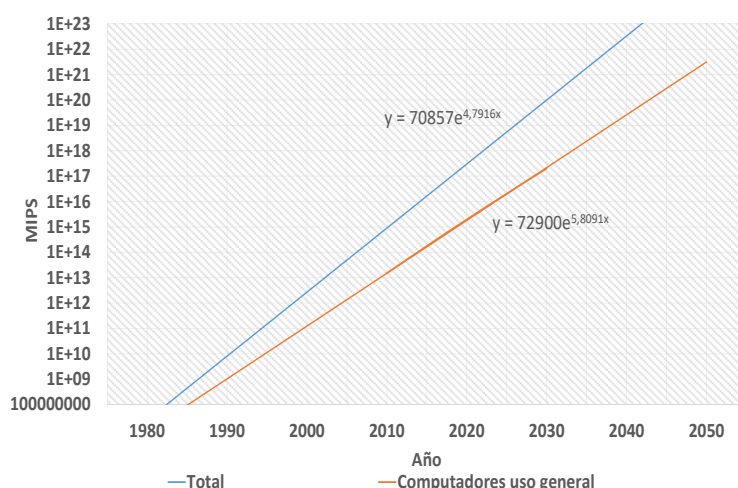


- El nº de **operaciones** que se hacen en un tiempo determinado y el nº de **bits** implicados en cada una de ellas
- El consumo energético medio en **computación** por bit en ese tiempo.
- El **tráfico de información** (nº de bits) que se producen en un tiempo determinado.
- El consumo energético medio en la **transmisión** de un bit

A. Prieto

21

Volumen de computaciones (Hilbert 2011)



- En el año 2040 se estima llegar a una potencia de procesamiento de $\approx 5 \times 10^{22}$ MIPS, una gran parte de los cuales ($\approx 5 \times 10^{19}$ MIPS) corresponderán a procesamiento de uso general.

A. Prieto

• M. Hilbert y P. Lopez, "The world's technological capacity to store, communicate, and compute information," Science 332 (2011) 60-65

22

Nº de transiciones (procesamientos) necesarias para ejecutar una instrucción (bits/s)



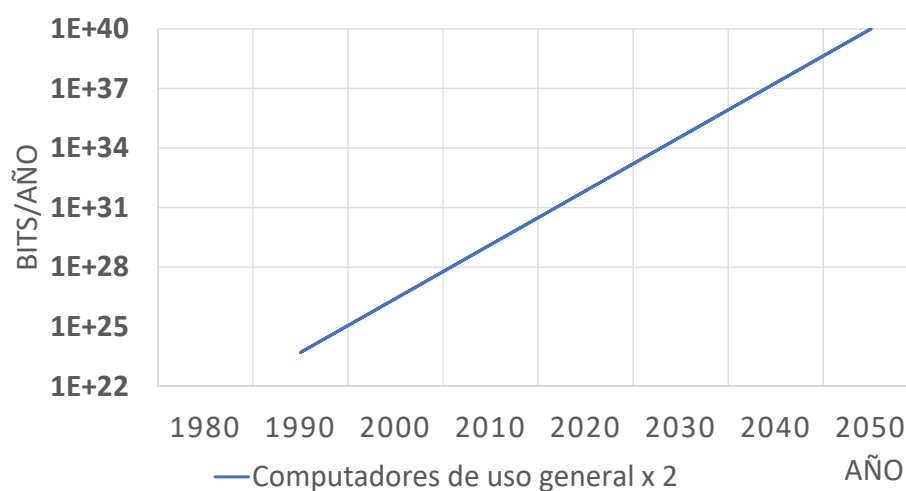
- Rendimiento binario (BTP, binary throughput): nº de transiciones (procesamientos) necesarios para ejecutar una instrucción en bits/s, que puede considerarse que depende polinómicamente de los MIPS:
 - $BTP = k \cdot MIPS^r$
- Con datos reales obtenidos hasta 2015, de 39 procesadores de uso general, se ha estimado, con un alto grado de precisión (coeficiente de determinación $R^2=0,98$), que $k \approx 3 \times 10^{10}$ y $r \approx 1.56$.

- F. Roccaforte, F. Giannazzo y G. Greco. (2022, Enero). Ion Implantation Doping in Silicon Carbide and Gallium Nitride Electronic Devices. *Micro* 2(1) pp. 23-53).
- Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action. (2015).

A. Prieto

23

De lo anterior se deduce la evolución anual del número total de transiciones binarias implicadas en computación



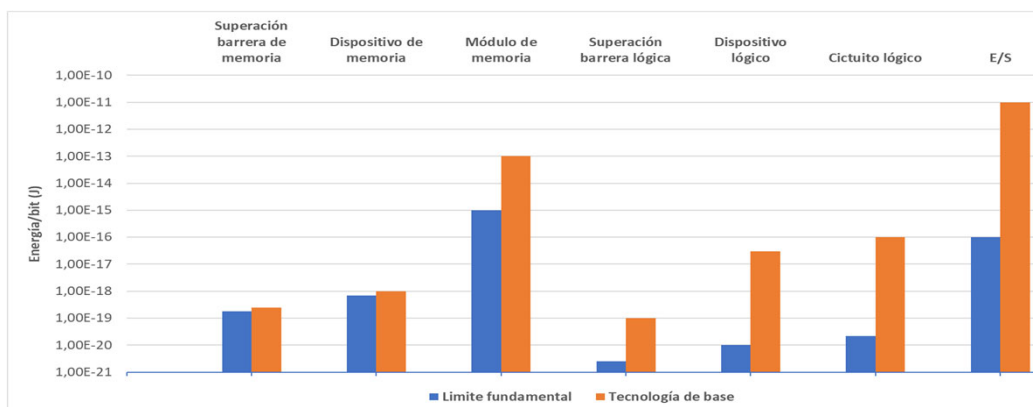
A. Prieto

24

V. Zhirnov et al. publican (2014) un artículo donde:



- Con datos reales obtienen la evolución del consumo por bit de diferentes elementos binarios (dispositivos lógicos y elementos de memoria)



- V. Zhirnov, R. Cavin y L. Gammaitoni. (2014). Minimum energy of computing, fundamental considerations. In ICT-Energy-Concepts Towards Zero-Power Information and Communication Technology. IntechOpen
- Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action. (2015). Append A4.

A. Prieto

25

V. Zhirnov et al. publican (2014) un artículo donde:



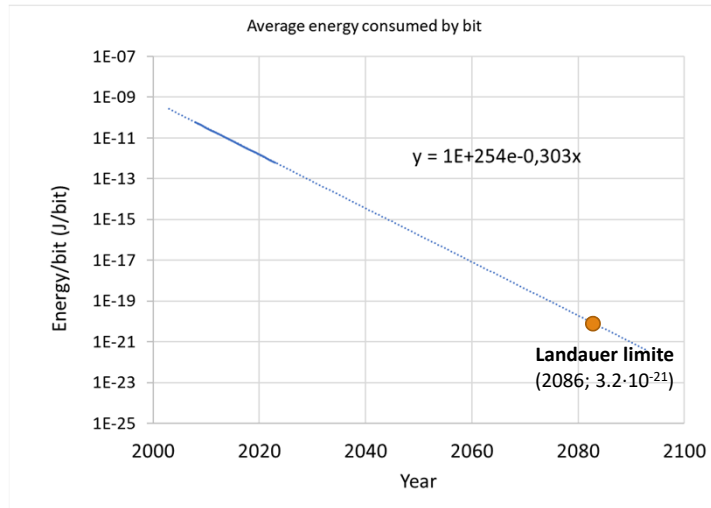
- Llegan a la conclusión de que, en situaciones típicas;
 - La energía mínima requerida por transición (conmutación) de un bit es de alrededor de $\approx 10^{-14}$ J/bit.
 - Valor estimado como un objetivo alcanzable $\approx 10^{-17}$ J/bit.

- V. Zhirnov, R. Cavin y L. Gammaitoni. (2014). Minimum energy of computing, fundamental considerations. In ICT-Energy-Concepts Towards Zero-Power Information and Communication Technology. IntechOpen
- Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action. (2015). Append A4.

A. Prieto

26

Evolución de la energía consumida por bit, con nuestros resultados, obtenidos a partir de la eficiencia energética:



≈ 10⁻¹³ J/bit

A. Prieto

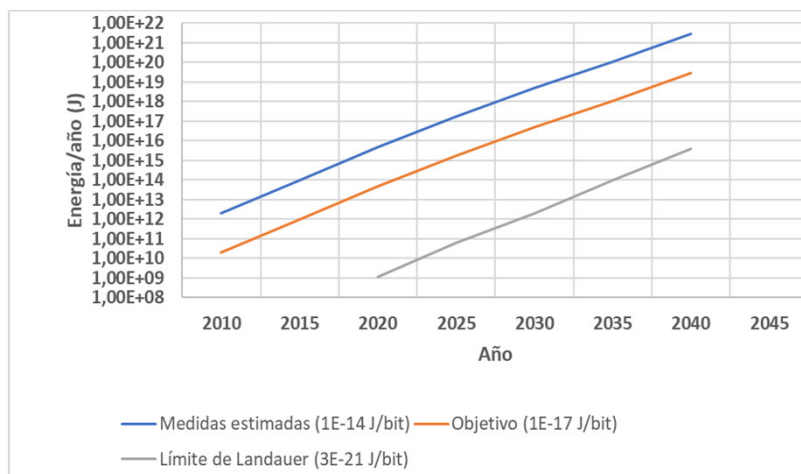
- A. Prieto, B. Prieto, JJ Escobar, T. Lampert (2024). Koomey's Law on the Evolution of Computing Energy Efficiency Revisited, *Remitido*.

27

Energía eléctrica global consumida por la informática en un año



- Valor calculado a partir de datos reales (2014): ≈ 10⁻¹⁴ J/bit
- Valor estimado por Zhirnov, como un objetivo a lograr ≈ 10⁻¹⁷ J/bit
- Límite de Landauer ≈ 3 · 10⁻²¹ J/bit

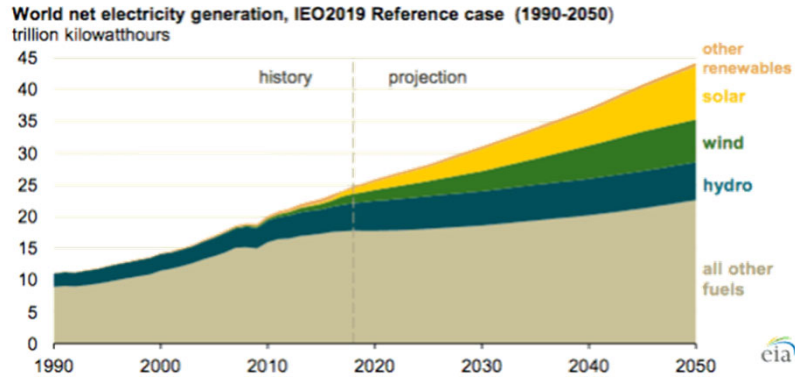


A. Prieto

- Datos obtenidos de Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, *Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action*. (2015)

28

La evolución del incremento de generación de electricidad es lineal

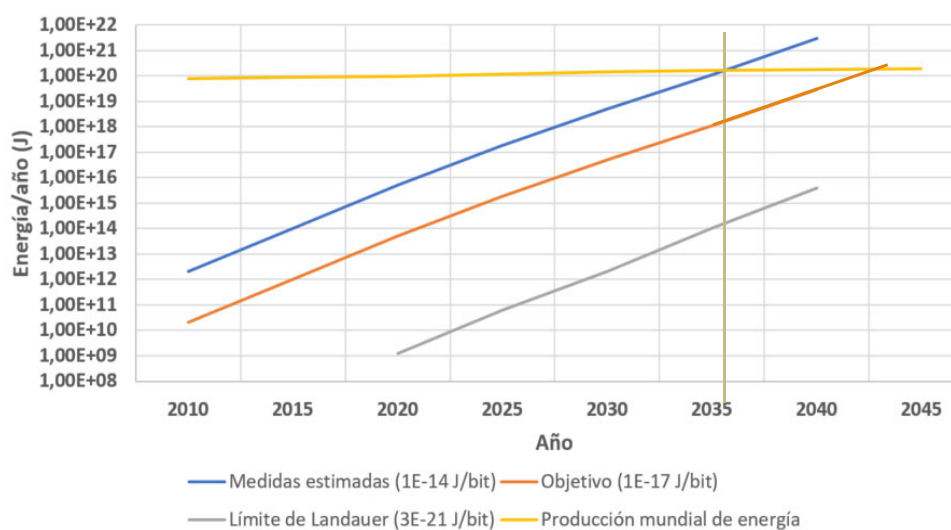


A. Prieto

<https://www.powermag.com/eia-renewables-will-account-for-half-of-global-power-generation-by-2050/>

29

En el peor de los casos, en 2035 no habrá energía eléctrica suficiente ...



A. Prieto

30

3. Procedimientos y técnicas para reducir la energía requerida por las TIC

31

Cómo reducir la generación de CO2 (PCO2↓)



- $PCO2 = \#Computaciones \cdot \frac{energía}{Computación} \cdot \frac{CO2}{energía} = NC \cdot \frac{1}{EE} \cdot FEE$
- NC↓ Reducción la cantidad de computaciones(NC). Mejora de algoritmos y programas
- E/C↑ Aumentar la eficiencia energética del hardware
 - Reducir la cantidad de energía por computación
 - Google estima que de una generación de Unidad de Procesamiento Tensorial (TPU) a otra, obtuvieron un aumento de rendimiento de 2,1 veces y mejoraron la eficiencia energética en 2,7 veces.
- FEE↓ Reducir el Factor de Emisión de Energía Eléctrica (MIX Eléctrico)
 - Centros de datos ubicados en lugares donde se produce energía limpias o renovables.

A. Prieto

32

- Afortunadamente las previsiones más pesimistas (mediados de la década de los 2010) sobre el consumo energético asociado a las TIC no se están cumpliendo, siendo menor que el esperado.
 - La industria alrededor de las TIC es consciente del problema y se están invirtiendo recursos financieros y políticas activas para reducir el incremento del consumo, tanto en la fabricación de nuevos productos como en el consumo inherente a su uso.
- Acciones para reducir el consumo:
 - A. Programación eficiente (software).**
 - B. Mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos.**
 - C. Planificación y gestión del uso de los recursos.**
 - D. Cambios de escala.**

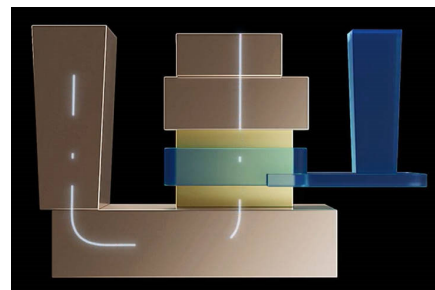
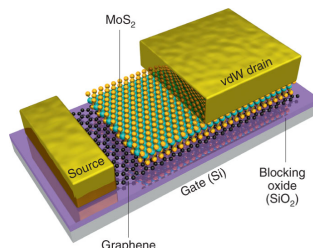
A. Programación eficiente

- Caracterizar los módulos del programa de acuerdo con su consumo energético.
- Elegir entre varias alternativas (entre navegadores, por ejemplo), la de menor consumo energético.
- Utilizar estrategias para que los algoritmos sean computacionalmente menos costosos y por tanto su ejecución más rápida → menor consumo de energía.
 - Se trata de “no matar hormigas a cañonazos”. Ejemplos:
 - Entrenar las redes neuronales para las tasas de error requeridas y no menor.
 - Podado de pesos, redes cuantizadas, comprensión de bajo rango. Parada temprana.
 - En aprendizaje en máquinas, a veces se pueden obtener resultados plenamente satisfactorios en aplicaciones de ámbito muy próximo y con conjuntos de datos similares, utilizando información de modelos previamente entrenados (meta-aprendizaje y aprendizaje por transferencia).
 - En las fases de aprendizaje no siempre es requerido que los datos sean de doble precisión (64 bits), pudiéndose utilizar en las primeras fases precisiones muy inferiores, incluso de 8 bits. De esta forma se reduce el coste computacional obteniéndose los mismos resultados que si se utiliza permanentemente doble precisión (Sensibilidad de los pesos en los resultados)
- **¡CUANTO MENOS INSTRUCCIONES TENGAN QUE EJECUTARSE MEJOR!**

B. Mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos ...



- Cambios en los dispositivos y en la arquitectura interior de los microchips.
 - Prototipo de IBM de CI que hace posible apilar verticalmente los transistores.
 - Incremento de la densidad de integración y reducción del consumo de energía (se estima que **hasta un 85% menos**).



IBM's VTFET with a vertical channel (yellow) and gate-all-around (blue). Contacts are brown and the white line shows current flow.

- Zhang, J., Gao, F., & Hu, P. (2021). A vertical transistor with a sub-1-nm channel. *Nature Electronics*, 4(5), 325-325.
- Steve Bush, (14 dec. 2021) IBM beats finFETs with vertical CMOS at IEDM. *Electronics Weekly.com*

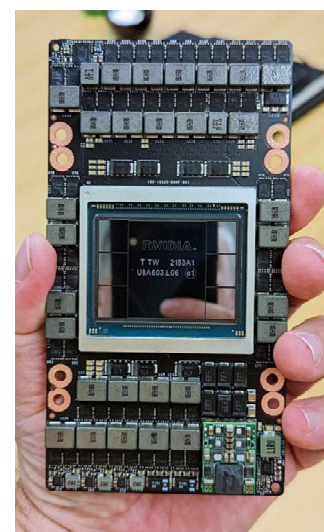
A. Prieto

35

... mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos ...



- Inclusión de funciones de gestión de energía dentro de las CPUs con los que, dependiendo de la carga de trabajo, cambian dinámicamente entre diferentes estados de energía (modo de espera, por ejemplo).
- Desarrollo de procesadores de uso específico para ámbitos o funciones concretas, como GPU y TPU.
- Fuentes de alimentación AC/DC conmutadas; introducción de nuevos materiales, como el nitruro de galio y el carburo de silicio, que permiten diseños a más altas frecuencias.



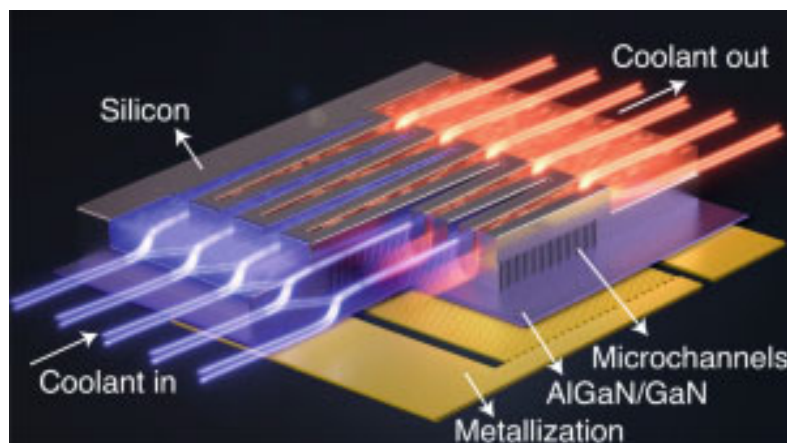
A. Prieto

36

... mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos ...



- Integración directa en los chips de sistemas de refrigeración con microfluidos, que sustituyan a los ventiladores externos.



A. Prieto

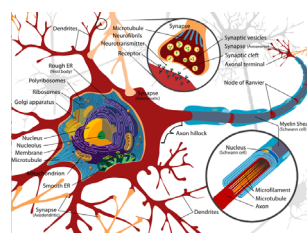
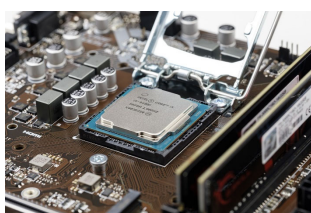
Varnava, C. Chips cool off with integrated microfluidics. Nat Electron 3, 583 (2020).

37

... mejoras tecnológicas en componentes y dispositivos electrónicos



- Cambios en la tecnología de otros dispositivos. HDD → SSD, reducción del consumo de energía superior al 50%
- Computación neuromórfica**



- El cerebro humano es uno de los sistemas más eficientes energéticamente del mundo, ya que consume una potencia de unos **25 vatios** (menos de la mitad de un PC portátil) y dispone de **86.000 millones** de elementos informáticos (neuronas).
 - Opino que el bajísimo consumo energético se debe más que a la arquitectura a la tecnología subyacente (material) → en lugar de silicio, arseniuro de galio, grafeno, etc. el del cerebro es de naturaleza biológica (bioquímica, células, tejidos,...)

A. Prieto

Imágenes de Pixabay y de Wikimedia Commons

38

C. Gestión y planificación del uso de los recursos:



- Utilizar los distintos sistemas tratando de reducir el consumo energético global, como:
 - Hacer entrar en los **modos de suspensión o de espera** a los recursos (servidores, sistemas de memoria etc.) que en un momento dado no sean necesarios.
 - **Escalado dinámico de la tensión y de la frecuencia** (*Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS*).
 - Ejecutar lentamente los programas que no necesiten un tiempo de respuesta muy corto.
 - Se estima que, **si la frecuencia de reloj se reduce a la mitad**, el tiempo de ejecución se duplica, pero **el consumo energético se reduce a una cuarta parte**.
 - Ejecutar, en lo posible, las aplicaciones dentro de **“horas valle”** donde la producción de energía eléctrica procedente de fuentes limpias es mayor por ser más elevada la producción eólica debido al viento u horas donde la radiación solar es mayor. Doble beneficio:
 - se reduce el coste económico de la energía necesaria para la ejecución de los programas
 - se favorece el uso de las energías alternativas.

A. Prieto

39

D. Cambios de escala



- La proliferación de teléfonos inteligentes y **pequeños dispositivos móviles** da lugar a una reducción del consumo energético ya que cada uno de ellos ofrece multitud de funciones y servicios que antes realizaban dispositivos de consumo independientes.
- Planificación y asignación de tareas a los recursos hardware disponibles teniendo en cuenta su **eficiencia energética**. En particular, debe explotarse el paralelismo de las aplicaciones y de los programas buscando la mejor eficiencia posible.
 - En muchos casos, una asignación eficiente de recursos requiere el rediseño de las aplicaciones y de los algoritmos.
 - Veamos un ejemplo...

A. Prieto

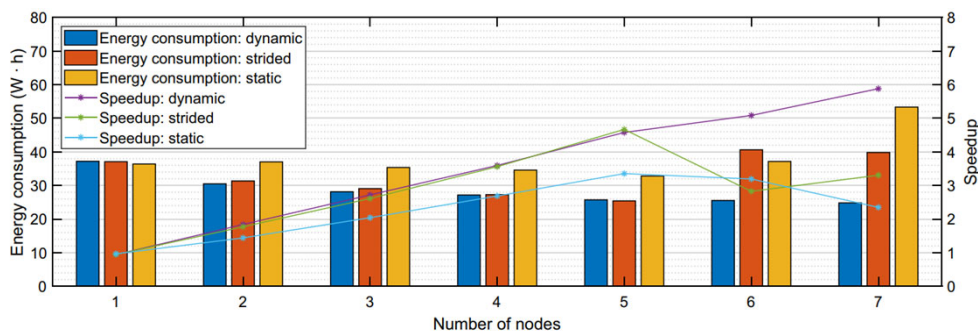
• Prieto, B., Escobar, J. J., Gómez-López, J. C., Díaz, A. F., & Lampert, T. (2022). Energy Efficiency of Personal Computers: A Comparative Analysis. *Sustainability*, 14(19), 12829.

40

Clasificación de EEG con 3600 características, utilizando mRMR-KNN



- Los resultados dependen de la distribución de trabajo entre los nodos del clúster. Utilizando paralelismo se reduce el consumo energético.



¡La implementación paralela con 7 nodos reduce a un 13,38% el consumo de la secuencial!

(a) Speedup and energy consumption when increasing the number of computing nodes

Escobar, J. J., Rodríguez, F., Prieto, B., Kimovski, D., Ortiz, A., & Damas, M. (2023). A distributed and energy-efficient KNN for EEG classification with dynamic money-saving policy in heterogeneous clusters. *Computing*, 105(11), 2487-2510.

A. Prieto

41

D. cambios de escala.



- Endoso computacional (offloading):** los procesos que requieren tareas informáticas intensivas se transfieren (endosan) a una plataforma externa, que puede ser desde un acelerador de hardware hasta un sistema de clúster, o recursos en la nube. **Tecnologías de virtualización.**
 - Sólo es beneficioso cuando se requiere gran volumen de computación con relativamente poca cantidad de comunicación.
- Fusión o transformación de centros de datos medianos a en **centros de datos hiperescala** (mucho mayores) (Google Cloud, Amazon Web Services, Microsoft Azure, OVHCloud, o Rackspace Open Cloud), donde el consumo de energía se gestiona mucho mejor.
- Como se estima que el consumo de energía por los centros de datos contribuye con un porcentaje superior al 30 % de todas las TIC. **A ellos les dedicaremos la siguiente sección.**

A. Prieto

42

4. Centros de Datos energéticamente sostenibles



43

Centros de datos sostenibles (energéticamente neutros)



- Los centros de datos son la columna vertebral de Internet y, por lo tanto, del mundo digital que en la actualidad, y poco a poco con más fuerza, gobierna la vida de las personas.
 - En los Centros de Datos se almacenan enormes cantidades de datos que son críticos para el desarrollo de las funciones diarias de los consumidores, de las empresas y de las Administraciones públicas.
- Según las previsiones realizadas por Andrae (2019), en el 2025 el consumo de los Centro de Datos representará el 18 % del consumo total de las TIC, y en el 2030 subirá al 34 %
 - CONSECUENCIA: para reducir el consumo de las TIC hay que considerar el de los Centros de Datos

A. Prieto

44

Centros de datos



- Un centro de datos es una instalación física que contiene de forma centralizada recursos de **almacenamiento, procesamiento, y distribución** (comunicación) de datos a los que se puede acceder remotamente.
- Se planifican en un entorno controlado y optimizado para garantizar la **seguridad** de los datos, la **eficiencia** y **disponibilidad** permanente de los servicios que presta (procesamiento en la nube, acceso fiable a la información a través de redes, etc.), y la minimización de los **efectos medioambientales**.
- Pueden ser de distintos tamaños desde pequeñas instalaciones con sólo unos pocos servidores hasta grandes complejos que ocupan miles de metros cuadrados y albergan cientos o incluso miles de servidores (hipercentros de datos).
- Deben estar equipados con sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), sistemas de climatización, sistemas de seguridad física, sistemas de detección y extinción de incendios, así como con una infraestructura de red sólida para garantizar el funcionamiento seguro y continuo de los equipos y de las aplicaciones alojadas en ellos.
- En la actualidad los Centros de Datos son fundamentales para el funcionamiento de aplicaciones en la nube, investigación científica y tecnológica, servicios de Internet, redes sociales, servicios virtuales, y una amplia gama de otras actividades que dependen de infraestructuras informáticas para sus operaciones diarias.
- Ejemplo: **Centro de Supercomputación de Barcelona (BSC) - Centro Nacional de Supercomputación**, ubicado en el Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

45

Centro de Supercomputación de Barcelona (BSC)



- La serie de supercomputadores de que ha dispuesto el BSC genéricamente se denomina MareNostrum, y desde su 4ª versión (MareNostrum, 2017) ha sido el supercomputador más potente de España.
- Se encuentra en un recinto totalmente acristalada ubicado en el interior de una antiguo templo, siendo reconocido por ello como el "supercomputador más bello del mundo"
- La versión MareNostrum 4 ocupa una superficie de unos 800 m², siendo capaz de ejecutar teóricamente unos 14.000 billones de operaciones con números reales por segundo (13,9 Pflops).

Fecha	Nov. 2022
Nombre	MareNostrum - Lenovo SD530
Posición en el TOP500	88
Posición en el GREEN500	117
Nº de procesadores (núcleos)	153.216
Rendimiento computacional pico (Pflop/s)	10,23
Rendimiento computacional máximo (Pflop/s)	6,47
Potencia (MW)	1,632
Eficiencia (Gflops/vatios)	3,965



La tabla contiene datos tomados de la lista oficial del TOP500.
<https://www.top500.org/lists/green500/list/2022/11/>

A. Prieto

46



47

MareNostrum 5

- En el año 2024 se inauguró el MareNostrum 5,
 - Ocupa unos 800 m² y contiene unos 160 Km de cables de interconexión. Todo lo necesario para el funcionamiento del MareNostrum 5 (refrigeración, transformadores eléctricos, etc.), ocupa unos 2.000 m².
 - Teóricamente puede realizar hasta 265.000 billones de operaciones con números reales por segundo (265 PetaFLOPS).
 - Dispone de 165.888 unidades de procesamiento (núcleos) trabajando en paralelo.
 - Participación de uso general: basada en la arquitectura x86 de Intel (procesadores Sapphire Rapids). 45,4 Pflops
 - Partición acelerada 4.480 procesadores GPUs Nvidia Hopper100 (en total 260 PetaFLOPS)
 - La memoria masiva de 248 petabytes en disco y 402 petabytes en cintas; con tiempos de lectura escritura de 1,6 y 1,2 Tbytes/s
 - Costo de 151,4 millones de €.

Fecha	Nov. 2022	Nov. 2023
Nombre	MareNostrum - Lenovo SD530	MareNostrum 5 ACC - BullSequana XH3000
Posición en el TOP500	88	8
Posición en el GREEN500	117	6
Nº de procesadores (núcleos)	153.216	680.960
Rendimiento computacional pico (Pflop/s)	10,23	265,57
Rendimiento computacional máximo (Pflop/s)	6,47	138,2
Potencia (MW)	1,632	2,560
Eficiencia (Gflops/vatios)	3,965	53,984



A. Prieto

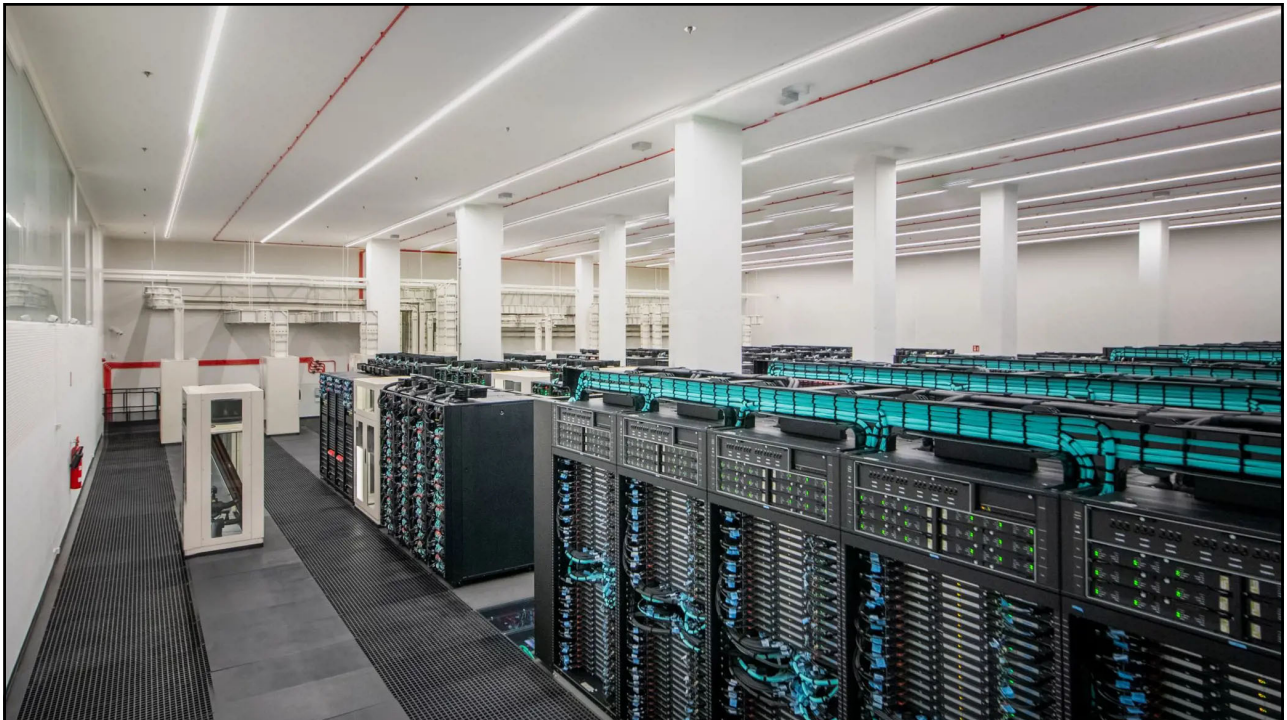
La tabla contiene datos tomados de la lista oficial del TOP500.
<https://www.top500.org/lists/green500/2023/11/>

48



BSC-CNS. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Inaugurado-el-MareNostrum-5-uno-de-los-superordenadores-mas-potentes-de-Europa-y-del-mundo>

49



Aplicaciones del MareNostrum

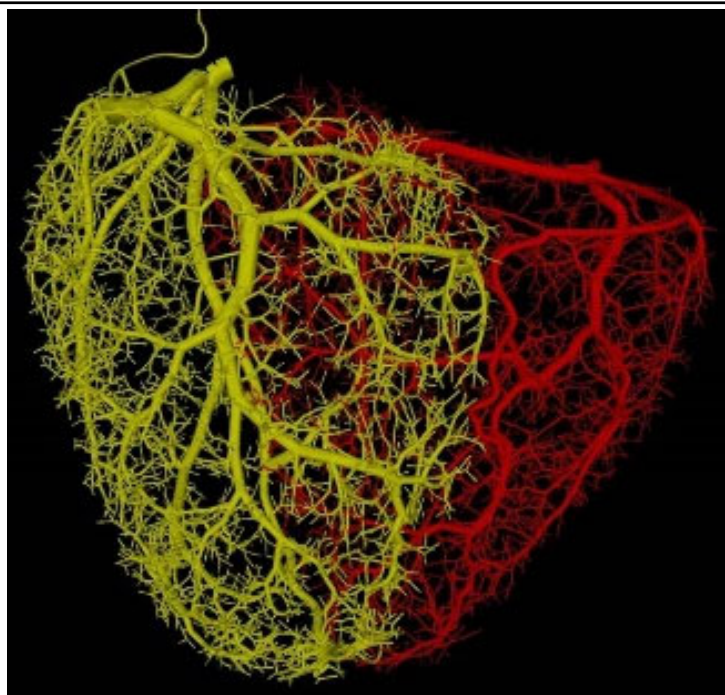


- Ofrece un amplio abanico de posibilidades en **investigación** sobre el clima, inteligencia artificial y medicina, entre otros campos.
- Uno de los ámbitos más relevantes de este supercomputador es realizar gemelos digitales; es decir, replicas virtuales de objetos, procesos o sistemas del mundo real. Con un gemelo digital es posible **analizar**, **simular** y **predecir** el comportamiento del sistema al que emula.
 - En medicina pueden reproducir procesos biológicos y enfermedades y explorar tratamientos y medicamentos personalizados
- Según palabras del Prof. Mateo Valero, Director del Centro, “El gran reto es hacer el primer gemelo digital del cuerpo humano”
 - El primer gemelo digital de un órgano fue del corazón.
 - A partir de imágenes de resonancia magnética y algoritmos desarrollados por Siemens Healthineers, se simula el proceso fisiológico del corazón real; permitiendo así realizar proyecciones virtuales para predecir la respuesta del órgano a un tratamiento antes de su intervención.

51



52



53

Infraestructura de los centros de datos

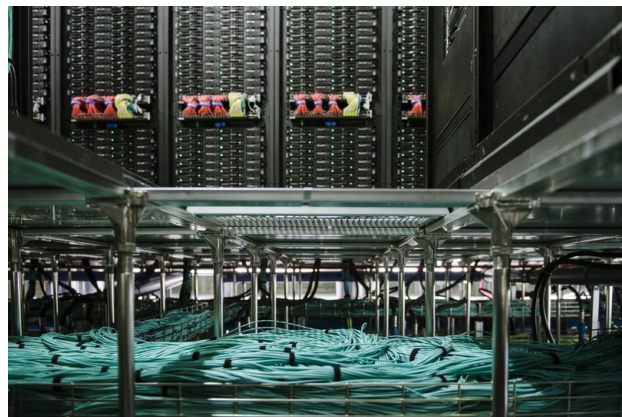


- Requieren unas instalaciones muy precisas y costosas de climatización.
 - La mayor parte de la energía disipada por los distintos equipos es en forma de calor, y hay que mantener una temperatura constante.
 - También se requiere una adecuada instalación de agua ya que la climatización con frecuencia necesita este elemento.
 - El MareNostrum usa un sistema de refrigeración por agua cerrado, que es mucho más eficiente que los métodos tradicionales de refrigeración por aire.
- En las imágenes se puede apreciar la infraestructura de refrigeración del subsuelo del MareNostrum.

54



A. Prieto



A. Prieto

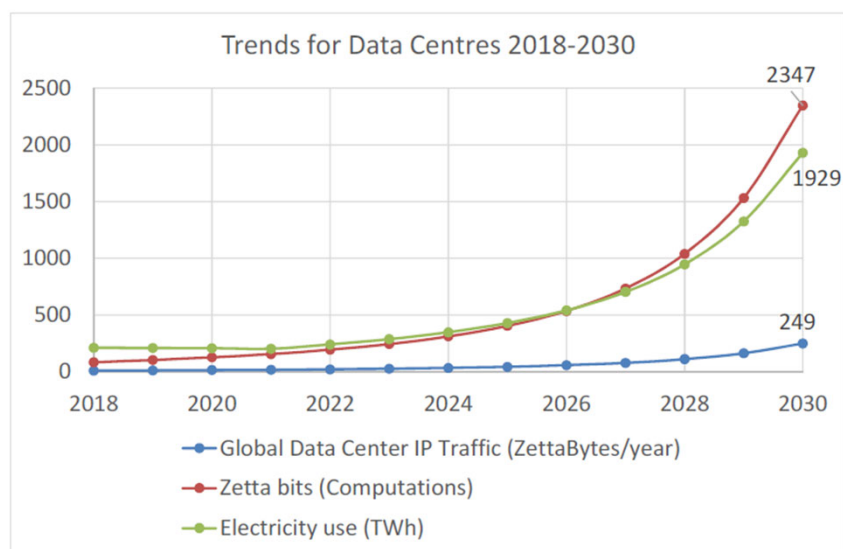
Costos de mantenimiento de los centros de datos



- El consumo energético y mantenimiento de un Centro de Datos es complejo y costoso.
 - Concretamente en el caso del MareNostrum se invierten **56 millones de euros anuales** para cubrir los costos de consumo energético y su mantenimiento (gastos de funcionamiento, refrigeración, actualizaciones y reparaciones eventuales)
- Alrededor de un 70% de los costes operativos son producidos por la electricidad
- El precio de compra de la energía es fijado en el mercado mayorista de acuerdo con el sistema europeo en el que existen normas comunes.
 - Los compradores y vendedores que operan en España negocian a través del Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE) fijan el precio de venta.
 - En el caso de los data centers y en la mayoría de industrias grandes consumidoras de energía, para evitar estar sujetos a las fluctuaciones de este mercado, compran a las comercializadoras mediante acuerdos en los que se fija un precio por kWh a futuro que suele ser, a la larga, más ventajoso que el del mercado.
 - En centros públicos se hace una licitación (a precio fijo).
 - Algunas comercializadoras de electricidad están rescindiendo unilateralmente los contratos con sus clientes, para evitar tener que asumir pérdidas, ya que les resulta preferible asumir las penalizaciones derivadas del incumplimiento de sus contratos, a las pérdidas obtenidas entre su precio de compra y el precio de venta fijo establecido.

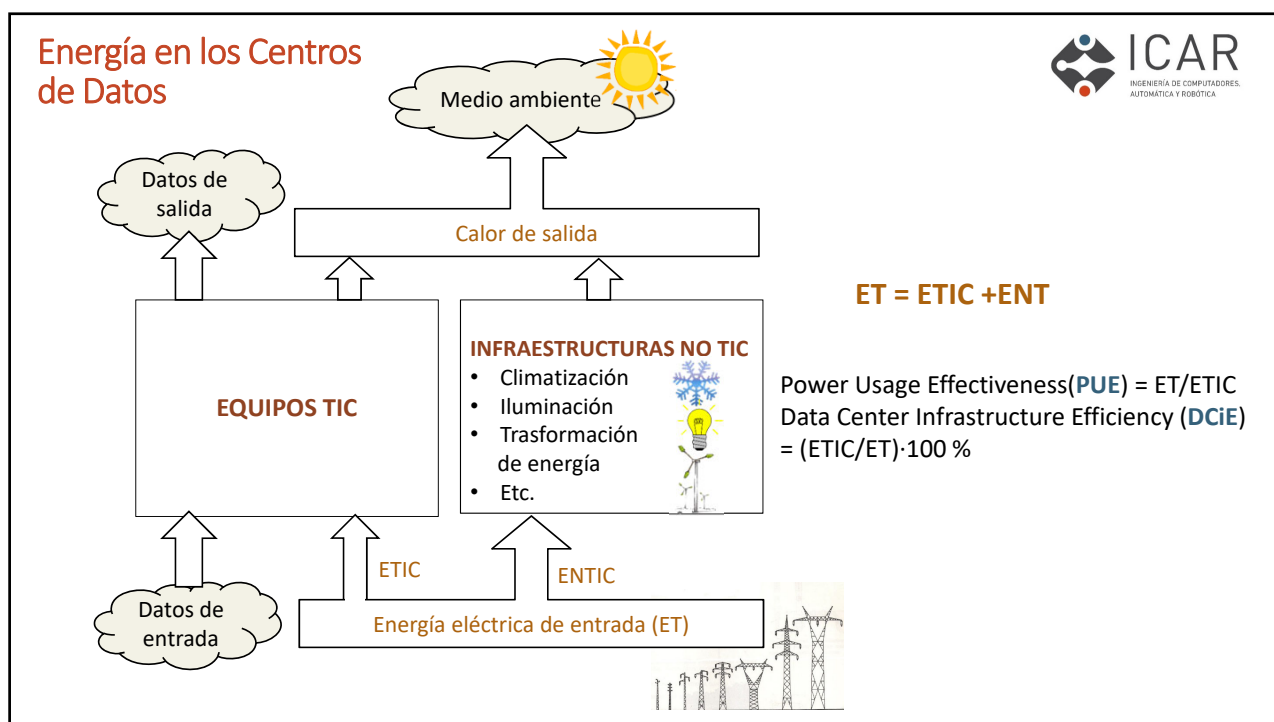
57

Previsiones de la actividad de los Centros de Datos (Andrae 2019)



A. Prieto

58



Eficacia del uso de energía (PUE) de un Centro de Datos

- **Eficacia del uso de energía (Power Usage Effectiveness, PUE)**
 - Mide el aprovechamiento energético de los centros de datos. Compara el total de energía consumida por un centro de datos con la cantidad de energía que realmente se usa para equipos TIC:
 - $$PUE = \frac{\text{Energía total consumida}}{\text{Energía consumida por TIC}} = 1 + \frac{\text{Energía no TIC}}{\text{Energía TIC}}$$
 - (Energía no TIC)/(Energía TIC) representa las pérdidas de energía en las instalaciones. Lo **ideal** es que sea 0 (es decir, **PUE=1**)
- Eficiencia de la infraestructura del centro de datos (Data Center Infrastructure Efficiency, DCiE)
 - Es el porcentaje de la energía consumida por las TIC con respecto a la energía total:
 - $$DCiE = \frac{\text{Energía consumida por las TIC}}{\text{Energía total consumida}} \cdot 100 \% = \frac{1}{PUE} \cdot 100 \%$$

A. Prieto 60

Ejemplos reales de eficiencia energética



- En EEUU 2020 el valor medio de la eficacia de sus Centros de Datos era PUE=1,59
 - La energía perdida equivale a un 59% de la energía TIC.
 - El DCiE = 62,89% de la energía es aprovechada por las TIC. El 37,11% restante son pérdidas
- El MareNostrum 5 se ha diseñado para obtener un PUE=1,08; es decir, sólo el equivalente al 8% de lo consumido en TIC se dedica a gastos adicionales (refrigeración, etc.)
- En los Centro de Datos de Google, en 2023-24, en verano PUE=1,1 ; y en invierno 1,08.

Valores cualitativos:

Nivel de eficiencia	Eficacia del uso de energía (PUE)	Eficiencia de la infraestructura del centro de datos (DCiE)
Muy ineficiente	3,0	33%
Ineficiente	2,5	40%
Medio	2,0	50%
Eficiente	1,5	67%
Muy eficiente	1,2	83%

61

Políticas de Centros de Datos para mejoras del medio ambiente



- Hacer entrar en los modos de suspensión o de espera a los recursos que en un momento dado no sean necesarios, etc.
- Migrar las aplicaciones a los equipos (servidores) de menor consumo, siempre que cumplan con los tiempos de respuesta requeridos.
- Ubicar los Centros de Datos próximos a lugares donde se generan energías limpias o renovables (Google, Microsoft, Amazon).
 - Las propias empresas están instalando sus generadores de energía. (autogeneración de energía)
 - 100% energía renovable propia
 - Incluso venden el exceso de energía producido.
- Ejemplos de centros de Google muy eficientes:

A. Prieto

62

Centro de Google en Oklahoma



- Oklahoma es un estado muy ventoso
- (PUE 1,09)



Great Western wind farm in Oklahoma
(225 MW for Google)

A. Prieto

63

Centros Google en Bélgica



Norther Offshore wind farm in Belgium (92 MW for Google)



Google's data center in St. Ghislain, Belgium.

A. Prieto

Centro de datos de Google en Dinamarca



Rødby solar farm in Denmark (55 MW for Google)

A. Prieto

65

Centro de Datos de Google en Hamina (Finlandia)



- Instalado en una antigua fabrica de papel (concepto de “Free Couling”).



A. Prieto

Image: YLE / Jani Aarnio

66

Planta de enfriamiento de Google en Hamina (Finlandia)



- Climatización muy crítica y su funcionamiento requiere un gran consumo energético.
- Al ser un país nórdico 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.
- PUE (abril 2024): 1,09

A. Prieto

67



68

Segundo Centro de Datos de Google en Hamina (\$672 millones)



A. Prieto [Reuters reported](#) yesterday that Google plans to spend approximately 600 million euros (\$672 million) on a second data center in Hamina, Finland. The investment is part of a global expansion effort.

69

Sistema de refrigeración del Centro de Datos de Changhua (Taiwan)

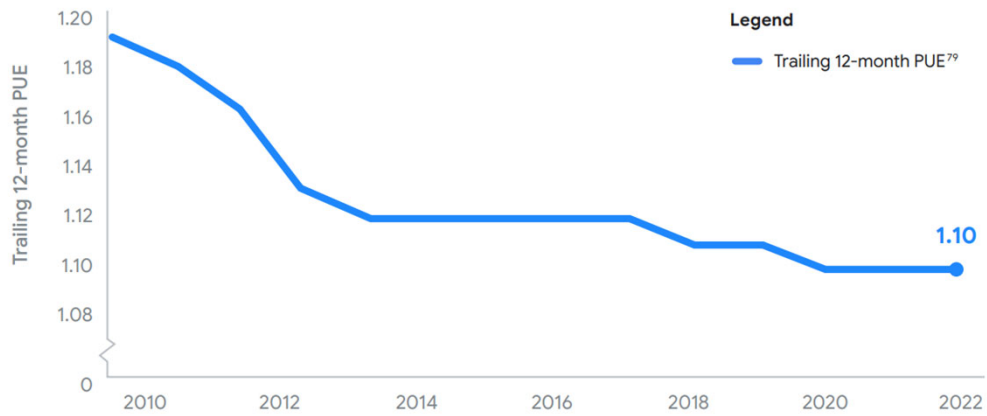


A. Prieto

- Photographer: Ashley Pon/Bloomberg

70

Evolución de la efectividad del uso de energía de centros de datos propiedad o gestionados por Google



• Eficiencia de los Centros de Datos de Google. <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>

A. Prieto

71

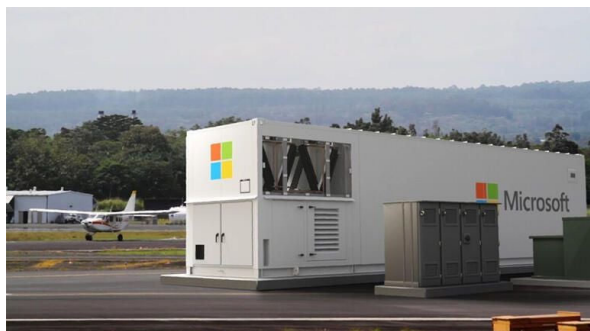
Centros de Datos Contenedores



<https://gesab.com/noticias/container-data-center-que-es-como-puede-ayudar-centro-datos/>

A. Prieto

72



GOOGLE: <https://www.youtube.com/watch?v=zRwPSFpLX8I>



A. Prieto

73

Proyecto Natick de Microsoft

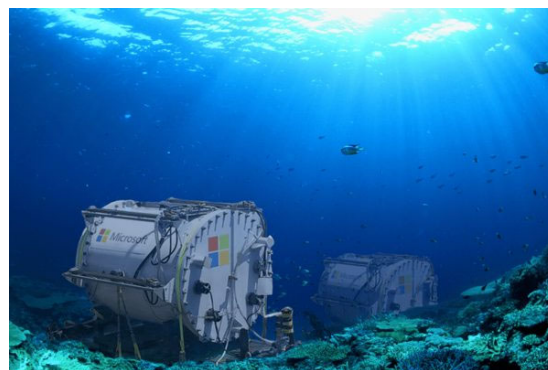
- Se sumergieron durante 2 años (2018 a 2020) 864 servidores en un contenedor similar a un submarino.
- Ubicación en las Islas Orcadas, en el norte de Escocia: aguas gélidas y la red eléctrica se abastece al 100% de energía eólica, solar y marina, etc. obtenida en las cercanías. No contaba con refrigeración activa.

• <https://news.microsoft.com/es-es/2020/09/15/proyecto-natick-el-futuro-de-los-centros-de-datos-bajo-el-mar-es-fiable-practico-y-sostenible/>

A. Prieto

74

Proyecto Natick de Microsoft



A. Prieto

75

Proyecto Natick de Microsoft



- Los servidores experimentaron una **tasa de fallos ocho veces inferior** a lo esperado en un Centro de Datos convencional, gracias, entre otras cosas, a la atmósfera de nitrógeno empleada en la cápsula sellada.
- El “Centro de Datos” se rescató del fondo marino, cubierto de algas, percebes y anémonas.
- Se concluyó que **el futuro de los centros de datos bajo el mar es fiable, práctico y sostenible.**



A. Prieto

76



Conclusiones

77

Como conclusiones generales de este vídeo y los anteriores sobre sostenibilidad de las TIC, podemos decir:



- Se estima que en el año 2030 las TIC gastarán aproximadamente el **13% de la electricidad mundial**, y para 2050 el consumo de los centros de datos será unas tres veces mayor que la cantidad total de energía generada en Japón.
- Hay establecidos hitos que hoy día son inalcanzables debido a las extraordinarias necesidades de computo y de energía requeridas.
- El **consumo de energía** debe considerarse por científicos, ingenieros y fabricantes como una medida de prestaciones tan importante como el **rendimiento computacional**.
- Por un lado, hay razones medioambientales y económicas, pero también la necesidad de mejorar la **autonomía de los dispositivos que utilizan baterías**.
- La reducción del consumo energético en el ámbito de las TIC es una cuestión trascendental, y debe ser afrontada desde muy distintos ámbitos (ingeniería de computadores, ingeniería del software, enseñanza, etc.) y trabajar hacia un equilibrio entre innovación y sostenibilidad.
- La sociedad debe estar informada de que el uso de las TIC (sea cual sea su forma) lleva implícito un consumo energético y hacerlo de forma razonable. Hay sencillos procedimientos y técnicas aplicables para reducir el consumo, a las que deberían acostumbrarse todos los usuarios.
- **¡Todos debemos contribuir, desde nuestros respectivos ámbitos, al reto de lograr la sostenibilidad de nuestro planeta!**

A. Prieto

78

- Deseo agradecer a las siguientes personas su colaboración en las investigaciones que estamos realizando sobre este tema:

- Beatriz Prieto Campos (UGR)
- Juan José Escobar (UGR)
- Miguel Damas (UGR)
- Antonio Díaz (UGR)
- Christian Morillas (UGR)
- Jesús González Peñalver
- Andrés Ortiz (UMA)
- Francisco Gil (UAL)
- Francisco Illeras

Nuestras investigaciones en este ámbito actualmente se están financiando parcialmente por:

Proyecto: **PID2022-137461NB-C31** financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa



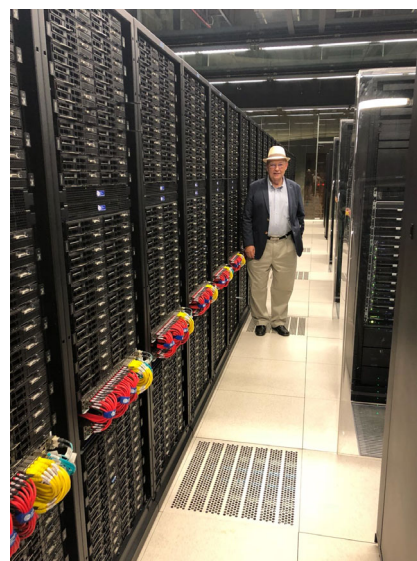
A. Prieto

79

¡Muchas gracias por tu atención!

- Alberto Prieto Espinosa.
- Conferencias:

<https://icar.ugr.es/informacion/directorio-personal/alberto-prieto-espinosa/web/conferencias>



A. Prieto

80 80