

Impacto de las TIC y la IA en el consumo energético global

ALBERTO PRIETO ESPINOSA,

Profesor Emérito UGR, Departamento de Ingeniería de Computadores,
Automática y Robótica. Life and Senior IEEE member.



Grupo Español

Microsoft Teams 18 de marzo 2026

1

Contenido

- ¿Qué entendemos por inteligencia?
- Algunos datos y situaciones prácticas sobre el consumo de programas de Inteligencia Artificial.
- Estimaciones sobre la evolución del consumo energético de computación y tráfico de datos digitales
- Procedimientos para reducir el consumo energético en TIC
- Conclusiones

A. Prieto

2

2

Desde el punto de vista de la Automática e Informática, la inteligencia artificial puede ser todo, o no todo lo que se dice



A. Prieto

3

3

¿Qué se entiende vulgarmente por Inteligencia Artificial?

- La inteligencia artificial es la capacidad de un dispositivo (como un móvil, ordenador o robot) para realizar tareas que generalmente requieren inteligencia humana.
- Inteligencia (RAE): “Capacidad de entender o comprender o de resolver problemas”.

• Oliver, N. (2021). Inteligencia artificial, naturalmente: un manual de convivencia entre humanos y máquinas para que la tecnología nos beneficie a todos. Inteligencia artificial, naturalmente, 1-161.

A. Prieto

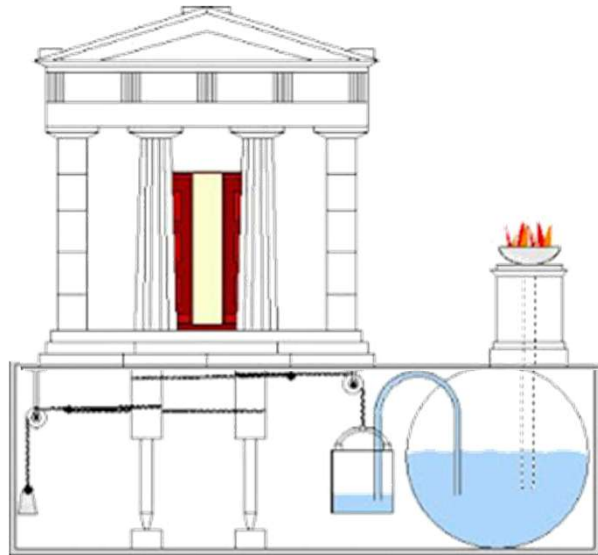
4

4

Ejemplo de “sistema inteligente” antiguo

- Siglo III a de C (autómatas)
 - Puerta templo de Herón de Alejandría

Sistema autónomo capaz de actuar y de tomar decisiones automáticamente



A. Prieto

5

5

La IA puede ser todo en el contexto de la Automática y de la Informática:

- Autómatas.
- Dificultad en multiplicar y dividir (escrito de 1570).
- Maquinas de calcular. Operaciones matemáticas:
 - Pascalina de Pascal (1642)
 - Multiplicar: Leibnitz (1700).
- El concepto de “toma de decisiones” en computadores lo introdujo Lady Ada Lovelace en 1843. En todos los lenguajes se puede programar la sentencia o estructura lógica “if... then...else...”
- Diseño del primer computador con programa almacenado EDVAC (junio 1945 a 1947)
- Cerebros electrónicos; cibernética.
- “Lo que nunca llegará a hacer un computador es ganar al ajedrez”
 - 1997 DeepBlue
 - 2027 AlphaZero
- Hoy es tan amplio y mediático el término de **Inteligencia Artificial** que vulgarmente (y sin rigor) se esta llegando a utilizar este término como sinónimo de **programa informático**.

A. Prieto

6

6

Concepto actual de IA. Características básicas:

- **Capacidad de Aprendizaje** (Machine Learning), extrayendo patrones de grandes cantidades de datos.
- **Adaptación y generalización:** aplicar lo aprendido a casos nuevos
- **Procesamiento de información no estructurada** (visión, lenguaje natural, etc.)
- **Tomas de decisiones y generación de inferencias** incluso a partir de premisas incompletas basadas en predicción estadística y no en reglas fijas.



• Oliver, N. (2021). Inteligencia artificial, naturalmente: un manual de convivencia entre humanos y máquinas para que la tecnología nos beneficie a todos. *Inteligencia artificial, naturalmente*, 1-161.

A. Prieto

7

7

IA no es todo lo que se dice (falta de rigor)

IDEAL

Miércoles, 9 de octubre 2019, 14:57

Llegan los parquímetros 'inteligentes' a la zona azul de Granada

Los nuevos parquímetros, dotados con un panel solar orientable, «son máquinas de última generación que permiten algo básico, pero que en Granada no lo había hasta ahora, como es el pago con tarjeta por el tiempo de uso que realmente hacemos de la zona azul. Así, a través de un monedero virtual el usuario puede recuperar el importe del tiempo no consumido».



A. Prieto

8

8

Problemas de la IA

A. Prieto

9

9

La IA es una herramienta poderosa que genera muchos beneficios, pero también presenta inconvenientes importantes como los siguientes:

- **Desplazamiento laboral.** En tareas rutinarias o repetitivas, creatividad, etc.
- **Sesgos y discriminación.** Reproducen los que contenga la información de entrenamiento.
- **Opacidad.** En ciertos casos se desconocen los argumentos de las tomas de decisiones.
- **Uso malintencionado:**
 - Filtración de datos confidenciales o personales
 - Noticias falsas (manipulación)
 - Suplantación de personas.
 - Automatización de ciberataques
- **Concentración del poder** en grandes empresas o países. Aumento de la brecha tecnológica.
- **Impacto ambiental.** **Alto consumo energético.** Incremento de la temperatura del agua.

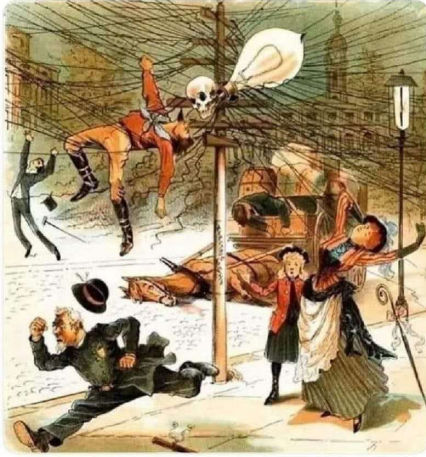
• Prieto, A., and Prieto, B. "Five questions and answers about artificial intelligence." arXiv preprint arXiv:2409.15903 (2024). DOI: [10.48550/arXiv.2409.15903](https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.15903)

A. Prieto

10

10

Como en todas las nuevas tecnologías la introducción de la iluminación eléctrica creó grandes controversias



Portada de la revista Judge de 26/10/1889 que hace referencia a la muerte del linero John Feeks en Nueva York

• https://www.reddit.com/r/PropagandaPosters/comments/g7a5iw/antielectricity_us_1900s/?tl=es

A. Prieto

11

11

Cartel con instrucciones de uso de la luz eléctrica



'No intente encender la luz con una cerilla. Simplemente gire la llave en la pared junto a la puerta'.

• Frank Schulenburg - Own work, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons

A. Prieto

12

12

Aplicaciones genuinas de IA

A. Prieto

13

13

Algunos dominios donde se utiliza aprendizaje profundo

(En los que se puede conocer fácilmente si la respuesta es correcta o no)

- Clasificación de imágenes, ImageNet
- Detección de objetos, MS COCO
- Question answering (SQuAD 1.1) (comprensión lectora sobre artículos Wikipedia)
- Named Entity Recognition CoNLL 2003 (nombres de personas, entidades, lugares, nº de telefonos, países, ciudades, etc.)
- Reconocimiento del habla (ASR SWB Hub500),
- Detección de caras (WIDER Face Hard),
- Generación de imágenes (CIFAR10), and
- Estimación de postura humana (MPII Human Pose).

Thompson, N. C., Greenewald, K., Lee, K., & Manso, G. F. (2020). The computational limits of deep learning. arXiv preprint arXiv:2007.05558.

A. Prieto

14

14

Consumo computacional y energético de aprendizaje profundo en algunas aplicaciones de referencia (proyección exponencial).

Aplicación de referencia	Tasa de error		Nº de operaciones (nº reales, flops)	Emisiones CO ₂ (Tm)	Consumo anual de nº de hogares en España	Costo (€)
Clasificación de imágenes, ImageNet	2022	9.00%	1,00E+25	4,54E+03	363	9,30E+07
	Objetivo 1	5%	1,00E+31	4,54E+10	3.632.000.000	9,30E+14
	Objetivo 2	1%	1,00E+93	4,54E+71	3,63E+70	9,30E+75
Detección de objetos, MS COCO	2022	38.7%	1,00E+23	4,54E+01	4	9,30E+05
	Objetivo 1	30%	1,00E+25	4,54E+04	3.632	9,30E+08
	Objetivo 2	10%	1,00E+50	4,54E+28	3,63E+27	9,30E+32
Comprensión lectora (SQuAD 1.1)	2022	9.4%	1,00E+23	4,54E+02	36	9,30E+05
	Objetivo 1	2%	1,00E+52	4,54E+31	3,63E+30	9,30E+34
	Objetivo 2	1%	1,00E+89	4,54E+67	3,63E+66	9,30E+71
Reconocimiento de nombres de entidades (CoNLL 2003)	2022	5.4%	1,00E+25	4,54E+03	363	9,30E+07
	Objetivo 1	2%	1,00E+62	4,54E+40	3,63E+39	9,30E+44
	Objetivo 2	1%	1,00E+121	4,54E+99	3,63E+98	9,30E+103

Emisiones de un hogar español en 1 año (incluye transporte...): 12,5 Tm CO₂

A. Prieto

15

15



Aprendizaje en Chat GPT-3 175B

- Contenido:
 - **175 mil millones de parámetros** (pesos y otros valores de las redes neuronales).
 - 800 GB de memoria
 - Procesamiento de consultas de hasta 2048 tokens (palabras o subpalabras), se consideran como “ventana contextual”. Eso significa que tiene 2.048 pistas a lo largo de las cuales se procesan los tokens sucesivos.
- Aprendizaje
 - Actualización enero de 2022.
 - **Pre-entrenamiento no supervisado de red neural profunda (96 capas) con un corpus de 570 mil millones de tokens recopilados de Internet en sitios como Wikipedia (3 mil millones), Common Crawl (410 mil millones), ...**
- Generación de texto
 - 96 capas de ANN transformers decoders (palabra + posición en la frase, etc.) que generan textos que simulan la redacción humana (concepto de “atención”, semántica de las palabras, contexto, etc.)

A. Prieto

16

16

Pre-entrenamiento de GPT-3 175B

- Tiempo total de computación para el pre-entrenamiento:
 - ≈ 3.000 PFLOPS·días

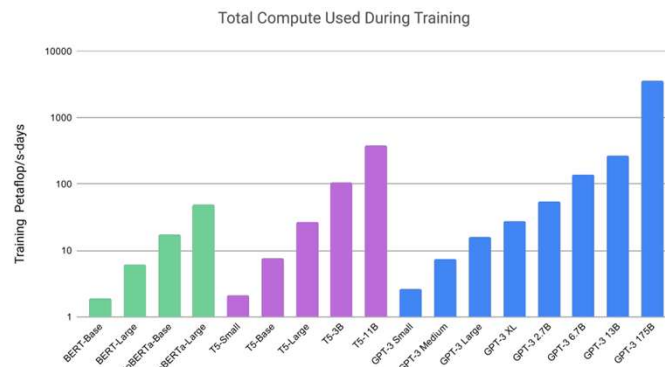


Figure 2.2: Total compute used during training. Based on the analysis in Scaling Laws For Neural Language Models [KMH⁺20] we train much larger models on many fewer tokens than is typical. As a consequence, although GPT-3 3B is almost 10x larger than RoBERTa-Large (355M params), both models took roughly 50 petaflop/s-days of compute during pre-training. Methodology for these calculations can be found in Appendix D.

- Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., ... & Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. Advances in neural information processing systems, 33, 1877-1901. Cited by 12,240

A. Prieto

17

17

Supongamos que el entrenamiento lo efectuamos con los #1 del TOP500 y Green500 (Noviembre 2025) <https://www.top500.org/>

Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Power (kW)	Energy Efficiency (GFlops/watts)
1	420	KAIROS - BullSequana XH3000, GH Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200 Superchip, Quad-Rail NVIDIA InfiniBand NDR200, RedHat Enterprise Linux, EVIDEN CALMIP / University of Toulouse - CNRS France	13,056	3.05	46	73.282
23	1	El Capitan - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A, Slingshot-11, TOSS, HPE DOE/NNSA/LLNL United States	11,340,000	1,809.00	29,685	60.941

- <https://www.top500.org/>

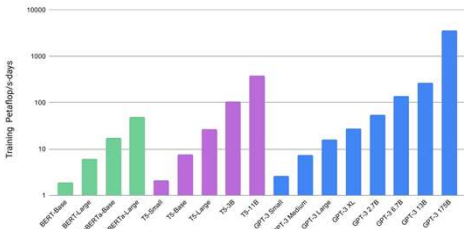
A. Prieto

18

18

El preentrenamiento a gran escala requiere grandes cantidades de cálculo, lo que consume mucha energía (ChatGPT-3 175B) DATOS 2025

	1º TOP500 (Novi. 2025) El Capitan (USA)	1º Green500 (Novi. 2025) Kairos (Francia)	
GPT-3 entrenamiento. PetaFLOPS-días	3.000,00	3.000,00	
Gigaflops-día	3,00E+09	3,00E+09	
Eficiencia energética (GFlops/watts)	60,94	73,28	
W-día	4,92E+07	4,09E+07	
KW-h	1,18E+06	9,83E+05	17%
MIX (Kg CO2/KWh) (2026)	0,343	0,044	87%
Huella de carbono (Kg CO2)	405.251,07	43.230,54	89%
Huella equivalente a hogares españoles (nº):	717	77	
Prestaciones, Rmax (PFlops)	1.809,00	3,046	
Tiempo ejecución (s)	1,43E+05	8,51E+07	
Tiempo de ejecución (dd:hh:mm:ss)	01:15:48:04	10:21:33:27	
Power (KW)	29.684,62	46,18	
Nº de instrucciones (GFLOP) entrenamiento	2,59E+14	2,59E+14	
Nº instrucciones (FLOP)	2,59E+23	2,59E+23	



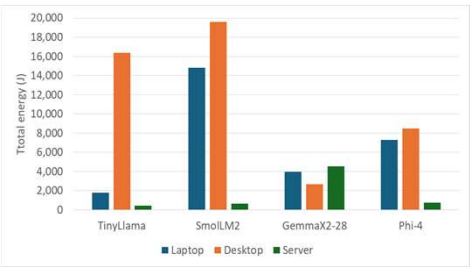
405 toneladas de CO2 (1 dd 15 hh) vs 44 ton (10 dd 21 hh)
¡717 / 77 hogares españoles durante 1 año!

A. Prieto

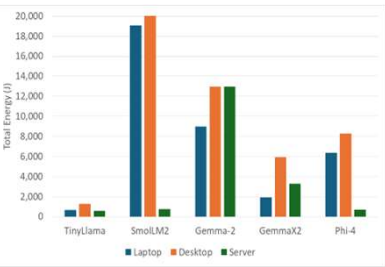
19

19

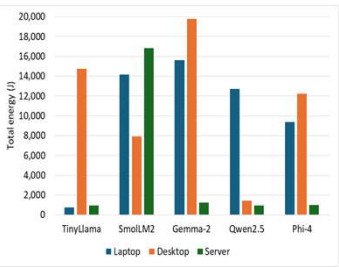
Consumo energético en inferencias SLMs realizadas en PCs.



Text generation



Text language translation



Code generation inference

Una inferencia: ≈ 1,71 Wh

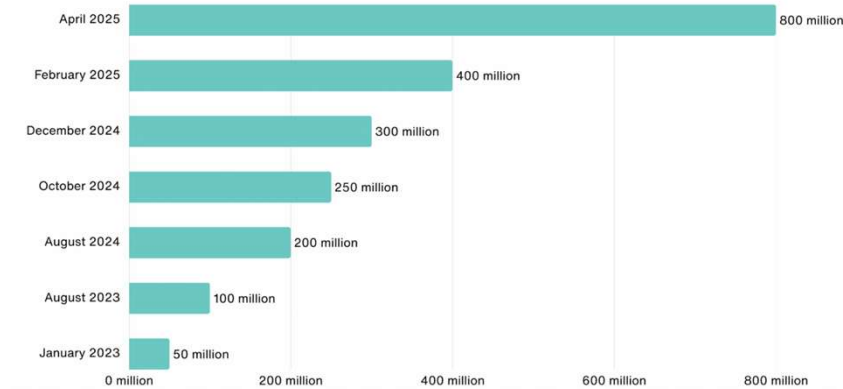
- García-Fernández, P.; Prieto, B.; García-Sánchez, P., Prieto A. Energy Consumption in Personal Computers in the Inference of Large Language Models (*Remitado*)

A. Prieto

20

20

Nº de usuarios activos semanales de ChatGPT a lo largo del tiempo



ChatGPT processes over 2 billion queries per day in 2025.

• <https://www.demandsage.com/chatgpt-statistics/>

A. Prieto

21

21

Consumo de inferencias frente a consumo de aprendizaje

- Chat GPT: nº de inferencias por día:
 - 2.500 millones.
- Consumo estimado por inferencia:
 - 3 W·h
- Consumo diario:
 - 7.500 millones de W
- Aprendizaje del Chat GPT 3.5:
 - $1,18 \cdot E6 \text{ KWh} \equiv 393 \cdot E6 \text{ inferencias} \rightarrow 3\text{h}: 46\text{m}$

¡Las inferencias realizadas en unas 4 horas de tiempo igualan al consumo del aprendizaje!

- Blake, A. (2025, July 22). Google should be worried – ChatGPT users now send 2.5 billion prompts a day, here's how that compares. Techradar.
- Hutt, G., Viswanathan, V., & Nadolski, A. (2019). Deliver high performance ML inference with AWS Inferentia.
- Wu, C. J., Raghavendra, R., Gupta, U., Acun, B., Ardalani, N., Maeng, K., ... & Hazelwood, K. (2022). Sustainable ai: Environmental implications, challenges and opportunities. *Proceedings of machine learning and systems*, 4, 795-813.

A. Prieto

22

22

¿Habrà suficiente energía para el desarrollo global de la IA?. A. Prieto.

23/02/2024

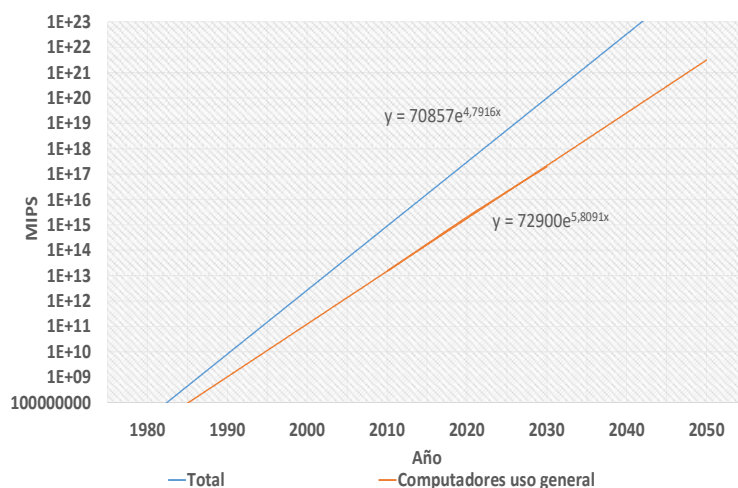
Estimaciones sobre la evolución del consumo energético

A. Prieto

23

23

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.

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

A. Prieto

24

24

24

¿Habr  suficiente energía para el desarrollo global de la IA?. A. Prieto.

23/02/2024

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).

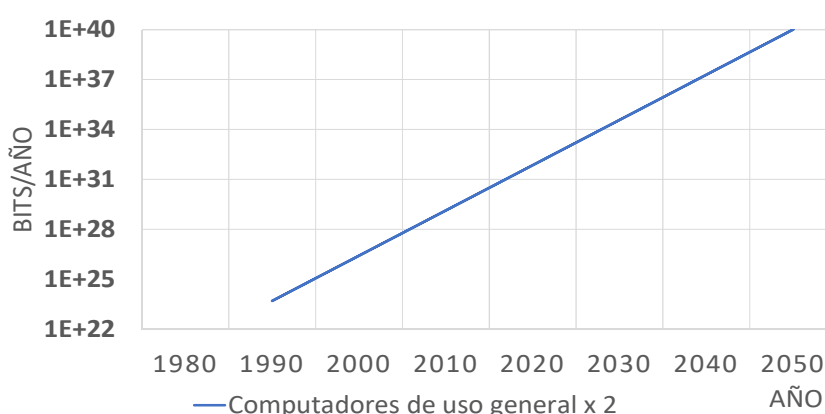
A. Prieto

25

25

25

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



En la referencia para 2026 se estimaban la información digital existente es menor: $2E+23$ bits

- Amount of Data Created Daily (2026) - Exploding Topics, fecha de acceso: marzo 13, 2026, <https://explodingtopics.com/blog/data-generated-per-day>

A. Prieto

26

26

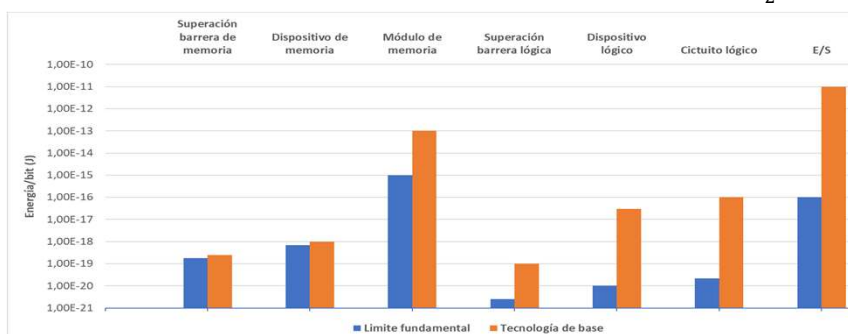
¿Habr  suficiente energía para el desarrollo global de la IA?. A. Prieto.

23/02/2024

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).

Por ejemplo, energía de carga o descarga de un condensador (un bit CMOS) : $\frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$



- 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

27

27

V. Zhirnov et al.(2014) 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.
- Valor obtenido por nosotros del TOP500 (Linpack. FP64):
 - $187,5 \cdot 10^{-14}$ 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

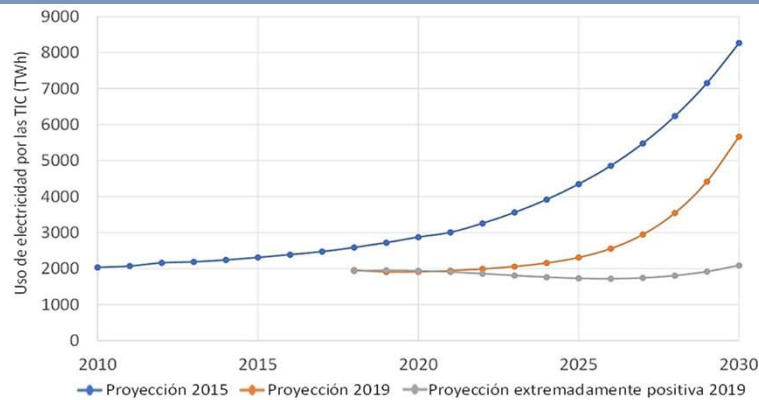
28

28

¿Habrà suficiente energía para el desarrollo global de la IA?. A. Prieto.

23/02/2024

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



$$E = P \cdot t$$

$$1 \text{ W} \cdot \text{h} = 3,600 \text{ Joules}$$

- 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

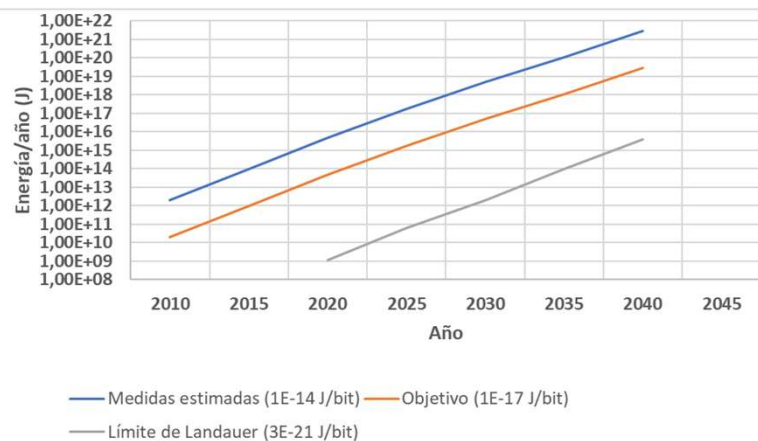
A. Prieto

29

29

Energía eléctrica global consumida por la informática en un año

- Valor calculado a partir de datos reales (2014): $\approx 10^{-14} \text{ J/bit}$
- Valor estimado por Zhirnov, como un objetivo a lograr $\approx 10^{-17} \text{ J/bit}$
- Límite de Landauer $\approx 3 \cdot 10^{-21} \text{ J/bit}$



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

A. Prieto

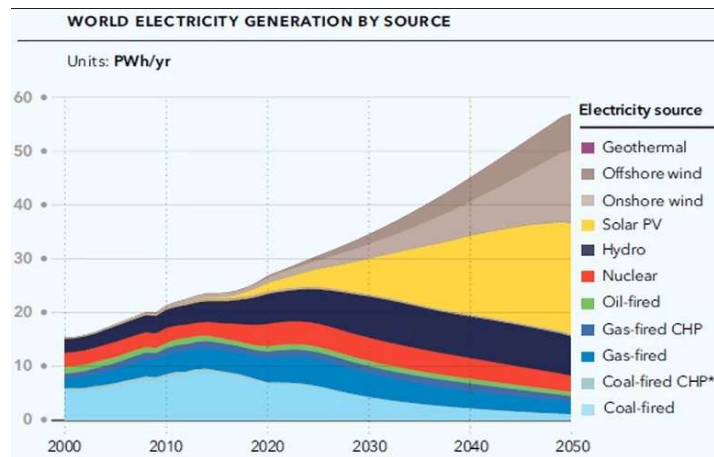
30

30

¿Habr  suficiente energía para el desarrollo global de la IA?. A. Prieto.

23/02/2024

Evolución mundial de la generación de energía eléctrica anual (PWh)



Peta: 10E+15

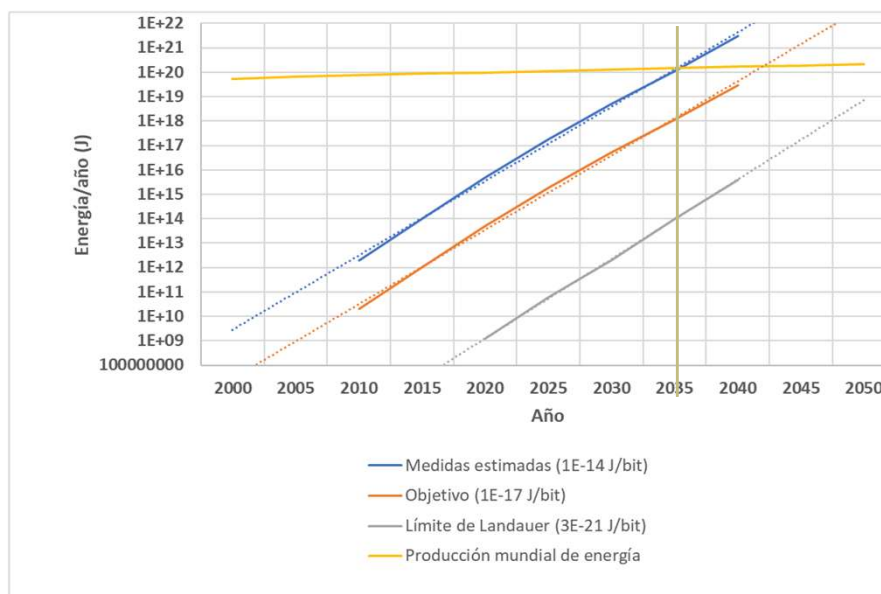
- International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook (WEO) 2025. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- Chrifi-Alaoui, L., Drid, S., Ouriagli, M., & Mehdi, D. (2023). Overview of photovoltaic and wind electrical power hybrid systems. *Energies*, 16(12), 4778.

A. Prieto

31

31

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



A. Prieto

32

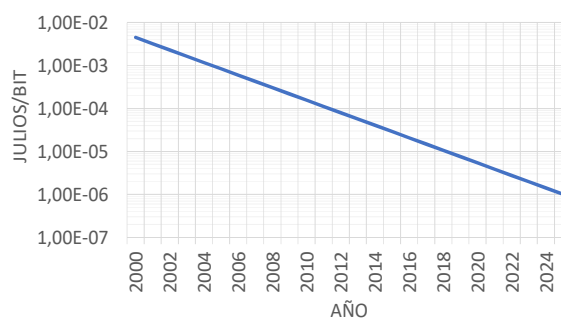
32

¿Habrà suficiente energía para el desarrollo global de la IA? A. Prieto.

23/02/2024

Estimación del consumo de energía en el tráfico por Internet

- Estimaciones de Aslan y cols.:
 - El consumo por bit se reduce a la mitad aproximadamente cada 2 años (en procesamiento cada 2,6 años).
- La energía media de transmisión de 1 bit en 2020 a través de Internet ha sido del orden de **$2,77 \cdot 10^{-6}$ J/bit**, lo que supone:
 - $\approx 2,8 \cdot 10^{11}$ veces mayor que la del procesamiento de un bit (10^{-17} J/b, Zhirnov)
 - 6 ordenes de magnitud mayor según la eficiencia energética de los supercomputadores obtenida por nosotros ($5,5 \cdot 10^{-12}$ J/bit)



- J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey y C. France. (2018). Electricity intensity of internet data transmission: Untangling the estimates. *Journal of industrial ecology*, 22(4), 785-798.

A. Prieto

33

33

Cómo aliviar el problema.
Procedimientos y técnicas para incrementar la eficiencia energética en las TIC

A. Prieto

34

34

- Afortunadamente las previsiones más pesimistas (mediados de la década de los 2010) sobre el consumo de las TIC no se están cumpliendo, siendo menor que el esperado.
- Acciones para reducir el consumo:
 - A. Mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos**
 - B. Gestión y planificación del uso de los recursos.**
 - C. Cambios de escala**

A. Prieto

35

35

Estimaciones del consumo energético por bit en distintas tareas

Operación	pJ/bit	Factores	Ref.
Procesamiento			
En procesadores CPU o aceleradores	0,005 a 10	(1)	[1,2]
Movimientos			
Movimiento on-chip	0,1 a 1	(2)	[3]
En motherboard (chip to chip, pistas de cobre)	1 a 20	(3)	[4]
Entre racks	100 a 200	(4)	[5, 6]
Entre racks (fibra óptica CPO/ZR)	10 a 40	(5)	[7]
Redes de datos			
Cables cortos de cobre (< 5m)	>10	(6)	[8]
Wi-Fi (acceso local)	100.000 a 5.000.000	(7)	[9]
Internet extremo a extremo	27.000.000 a 75.000.000	(8)	[10 -12]
Internet (core) incluyendo transceptores, un nodo de conmutación y amplificadores (J/bit-Km)	0,1 a 0,5	(9)	[13]

- 1) Arquitectura del núcleo (paralelismo a nivel de instrucciones y de datos), precisión aritmética (FP32 vs INT8), tecnología de proceso (nm), etc.
- 2) Redes en chip (NoC), capacitancia de los cables metálicos, saltos de ruteo
- 3) Conversiones SerDes (paralelo/serie), atenuación en las pistas de cobre, interfaces HBM (3D)/DDR (Doble Data Rate), capacitancia de pines.
- 4) Conmutadores Ethernet, transceptores ópticos, cables de cobre activo
- 5) Sustitución del camino eléctrico por el óptico. CPO (Co-Packaged Optics), elimina el módulo óptico enchufable.
- 6) Pérdida resistiva, integridad de la señal, ecualización. Se elimina la necesidad de conversión optoelectrónica.
- 7) Distancias, obstáculos e interferencias al compartir el espectro.
- 8) Datos incluyendo el ecosistema completo con la infraestructura local: transceptores, conmutación ASIC y amplificadores, almacenamiento temporal (buffers) redes de acceso, refrigeración, gestión de espectro, colisiones, sobrecarga de protocolos).
- 9) Infiuye la eficiencia de los amplificadores ópticos (EDFA) y de la modulación (QAM).

A. Prieto

Pico: E-12

36

36

Referencias sobre el consumo energético por bit

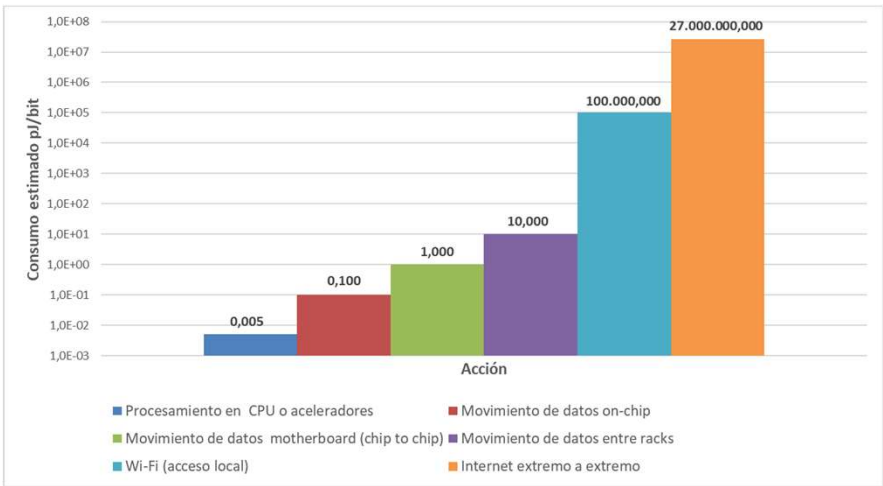
1. TSMC. (2024). *Sustainability Report: Energy Efficiency in Nano-scale nodes*. Horowitz, M. (2023). Computing's Energy Problem (and what we can do about it). IEEE International Solid-State Circuits Conference. 10.
2. U.S. Department of Energy (DOE). (2024). Energy Efficiency Scaling for Two Decades Research and Development (EES2) Roadmap. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-08/Draft_EES2_Roadmap_AMMTO_August29_2024.pdf.
3. Miller, D. A. (2017). Attojoule optoelectronics for low-energy optical interconnects and computing. *Nanophotonics*, 6(3), 603-613
4. Keckler, S. W., Dally, W. J., Khailany, B., Garland, M., & Glasco, D. (2011). GPUs and the future of parallel computing. *IEEE Micro*, 31(5), 7-17.
5. Rumley, S., et al. (2017). Optical interconnects in future servers, accelerators and data centers. *Journal of Lightwave Technology*, 35(3), 395-404.
6. Energy Efficiency in Optical Networks: pJ/bit Metrics and Green ..., fecha de acceso: marzo 13, 2026, <https://mapyourtech.com/energy-efficiency-in-optical-networks-pj-bit-metrics-and-green-network-design/>
7. Sun, C., Wade, M. T., et al. (2015). Single-chip microprocessor that communicates directly using light. *Nature*, 528(7583), 534-538. <https://doi.org/10.1038/nature16454>
8. TredForce. (2026). *Micro-LED co-packaged optics cut power consumption*. Semiconductor Today.
9. Huang, J., & Hinton, K. (2022). Energy consumption model for end-to-end data transmission in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(2), 715-728.
10. Aslan, J., Mayers, K., Koomey, J. G., & France, C. (2018). Electricity intensity of internet data transmission: Untangling the estimates. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 785-798. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
11. MapYourTech. (2026). Energy Efficiency in Optical Networks: pJ/bit Metrics and Green Network Design.
12. Coroama, V. C., & Hilty, L. M. (2024). Assessing the energy intensity of Internet data transmission: State of the art and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140325.
13. ITU-T. (2024). *Energy Efficiency of Optical Transport Networks*.

A. Prieto

37

37

Análisis del consumo energético por bit en distintas tareas



• Elaboración propia, con los valores mínimos de la tabla

A. Prieto

38

38

Análisis sobre consumo por bit en distintas tareas

- El principal gasto energético no es el cálculo, sino el movimiento del bit. Las arquitecturas de 2050 deberán ser radicalmente locales, procesando los datos donde se generan (Edge Computing).
- Mover datos a través de una red inalámbrica como Wi-Fi puede costar hasta 200.000 veces más energía por bit que procesar ese mismo bit dentro de un acelerador de alto rendimiento.
- Mover un bit mediante Wi-Fi 6 (IEEE **802.11ax**) consume aproximadamente **11.000 veces más energía** que procesarlo en un acelerador de IA
- La fibra óptica (Core) es varios órdenes de magnitud más eficiente que las redes inalámbricas (espacio libre) o locales debido a la baja atenuación física.
- En los sistemas de fibra óptica de alta capacidad y cables submarinos que sostienen el tráfico global, el costo energético del trayecto completo (incluyendo transceptores, un nodo de conmutación y amplificadores) se estima en un rango de 0,1 a 0,5 pJ/bit por km.

A. Prieto

39

39

39

Mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos ...

- Estrategias principales utilizadas en el diseño de circuitos "Low Power Design":
 - **Entrada de reloj:** La señal de reloj no actúa simultáneamente en todos los Flip-Flops; de forma que los no usados no consuman energía.
 - **Ajuste de la lógica:** El diseño lógico de los circuitos se hace considerando su consumo energético como un parámetro de diseño.
 - **Celdas con múltiples tensiones umbrales:** Cuanto menor es la tensión umbral son menores las corrientes de fugas, aunque disminuye la velocidad
 - **Control de la polarización del sustrato:** Se ajusta la tensión de los sustratos, permitiendo así controlar las variaciones y el consumo.
 - **Ajuste de VDD:** Se utilizan diferentes voltajes de alimentación (VDD) que pueden cambiar según la necesidad de rendimiento.
 - **Desconexión de potencia:** Se desconectan secciones enteras del chip cuando no se usan.

• Rubio, A. Consumo Energético en Sistemas Digitales Avanzados (4 dic. 2025), Conferencia de la IEEE Sección España. <https://youtu.be/JLeAH0zVQUU?si=rJFSQAql0xHf6qYI>.

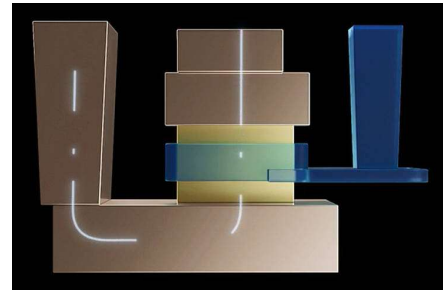
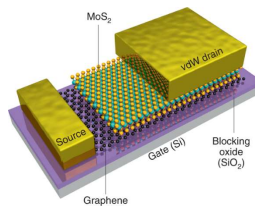
A. Prieto

40

40

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

- Reducción de tamaño de tecnología (4nm). Uso de semiconductores de óxido y grafeno para reducir fugas en tecnologías sub-3 nm.
- Cambios 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 diciembre 2021) IBM beats finFETs with vertical CMOS at IEDM. *Electronics Weekly.com*.
- Alsharif, M. H., Kelechi, A. H., Albreem, M. A., Chaudhry, S. A., Zia, M. S., & Kim, S. (2021). From 5G to 6G

A. Prieto

41

41

... 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.



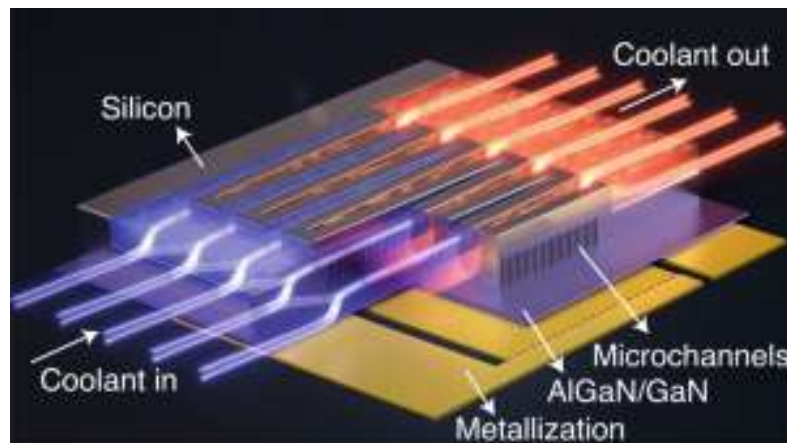
A. Prieto

42

42

... 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.



Varnava, C. Chips cool off with integrated microfluidics. Nat Electron 3, 583 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00494-5>

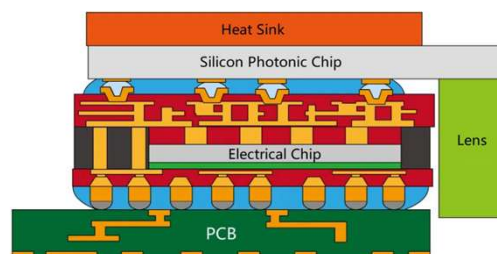
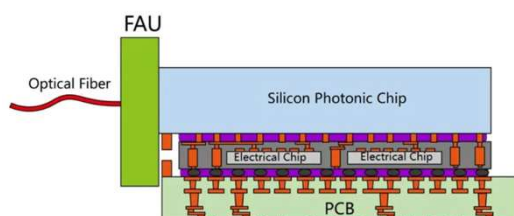
A. Prieto

43

43

Fotónica de silicio

- Fotónica de Silicio: La comunicación óptica dentro de los chips (on-chip) y entre unidades (chip-to-chip) utiliza la fotónica de silicio para sustituir por pulsos de luz las señales eléctricas tradicionales, lo que reduce drásticamente el consumo de energía y aumenta el ancho de banda.
- Se está adoptando la Óptica Co-empaquetada (CPO, Co-Packaged Optics), que integra los láseres y moduladores dentro del mismo sustrato del procesador, estimando reducir la potencia a menos de 7pJ/bit

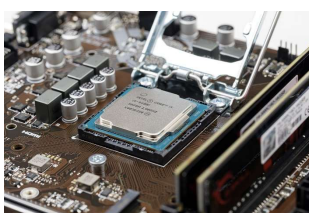


- Intel Labs. (2025). *Co-Packaged Optics for Next-Gen Data Centers*.
- <https://www.fibermall.com/es/blog/overview-of-cpo.htm>

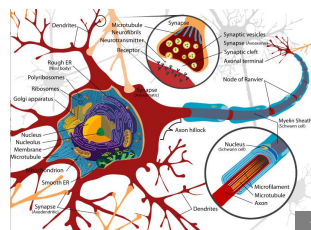
44

... Computación neuromórfica

- Computación neuromórfica
 - El cerebro humano es uno de los sistemas más eficientes energéticamente 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, etc. el del cerebro es de naturaleza biológica (bioquímica, células, tejidos,...)



pixabay



Wikimedia Commons

- Avram Bar-Cohen (DARPA), "Cognitive computing, Towards the electronic brain," presentation at the Workshop on Rebooting the IT Revolution, Washington, DC, March 30 & 31, 2015
- Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action. (2015)

A. Prieto

45

45

Acceso a memoria

- DDR5 (Double Data Rate 5)
 - Reducción alimentación a 1.1V, lo que implica un ahorro de energía => 15 pJ/bit.
- LPDDR5 (Low Power Double Data Rate 5)
 - Diseñada específicamente para dispositivos donde la eficiencia energética y la disipación térmica son la prioridad (móviles y aplicaciones a la frontera). Alimentación a 1,05 V => 10pJ/bit.
- PIM-DRAM (Processing In Memory).
 - Procesamiento en memoria: Se elimina o reduce la longitud de los buses de datos memoria-CPU (sumideros de energía). Se consigue 1pJ/bit pero con precisiones < 4 bits.
 - También se está desarrollando (In-Flash Processing)

- Ghose, S. et al. (2024). Processing-in-Memory: A Survey of Recent Advances. arXiv.

A. Prieto

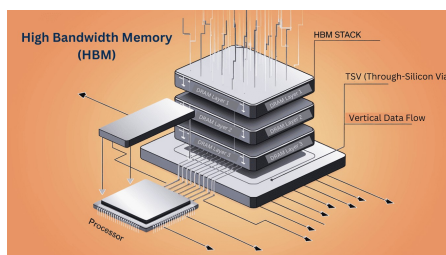
46

46

46

HBM (High Bandwidth Memory), la cúspide de la eficiencia por bit.

- Utilizan una arquitectura de apilamiento vertical (3D), en lugar de colocar chips de memoria de forma plana sobre la placa base, se apilan verticalmente capas de DRAM una sobre otra.
- La memoria se comunica con el procesador (GPU o CPU) mediante un interposer de silicio, utilizando miles de conexiones ITSV (Through-Silicon Vias), que conforman un bus de datos extremadamente ancho (1,024 bits o más) con lo que obtienen anchos de banda muy altos a frecuencias de reloj moderadas.
 - Se reduce la energía de conmutación requerida para mover grandes volúmenes de datos.



• Wevolver. (2024). *High Bandwidth Memory: Concepts, Architecture, and Applications*. <https://www.wevolver.com/article/high-bandwidth-memory>

A. Prieto

47

47

47

HDD

- Cambios en la tecnología de otros dispositivos. HDD → SSD, reducción del consumo de energía superior al 50%
- HDD: Almacenamiento Magnético Asistido por Calor (HAMR), que utiliza un láser diminuto para calentar (mayor densidad y menor consumo por bit).
- HDD: 1.000 a 10.000 pJ/bit
- SSD (NAND Flash): 100 a 1.000 pJ/bit

A. Prieto

48

48

48

B. Gestión y planificación del uso de los recursos:

- Utilizar los distintos sistemas tratando de reducir el consumo energético global:
 - 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.

A. Prieto

49

49

C. 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.
- **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.

A. Prieto

50

50

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.



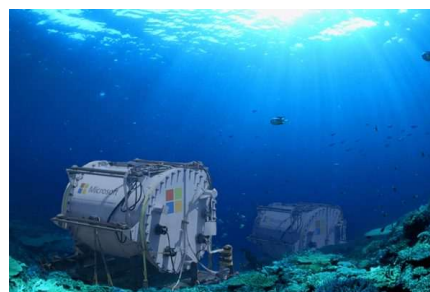
A. Prieto

51

51

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

52

52

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.
- 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



53

53

Energía Solar Espacial (SBSP)

- La idea principal es capturar la luz del Sol de forma ininterrumpida (sin nubes y sin noches) y enviarla a la superficie mediante señales electromagnéticas.
- El Sol es la clave para generar toda la energía que la humanidad requerirá en el futuro, según Elon Musk.
- Ventajas:
 - Energía constante: No depende de la noche (si no son geoestacionarios) ni de las nubes.
 - Alta Intensidad: Fuera de la atmósfera, la luz solar es mucho más potente.
 - Energía Global: Se puede enfocar a distintos puntos remotos del planeta.

A. Prieto

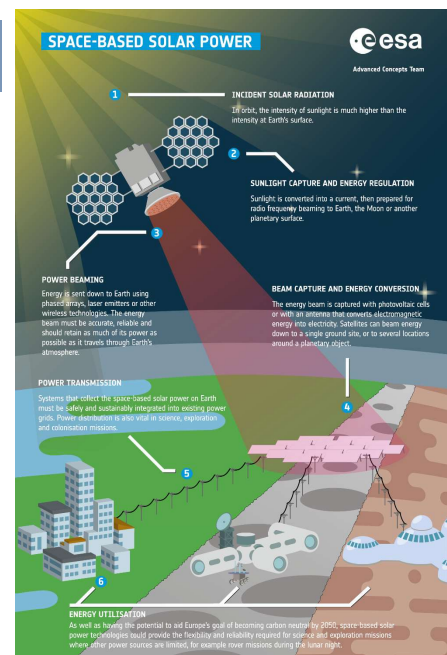
54

54

Esquema de una Base Solar Espacial de energía (SBSP)

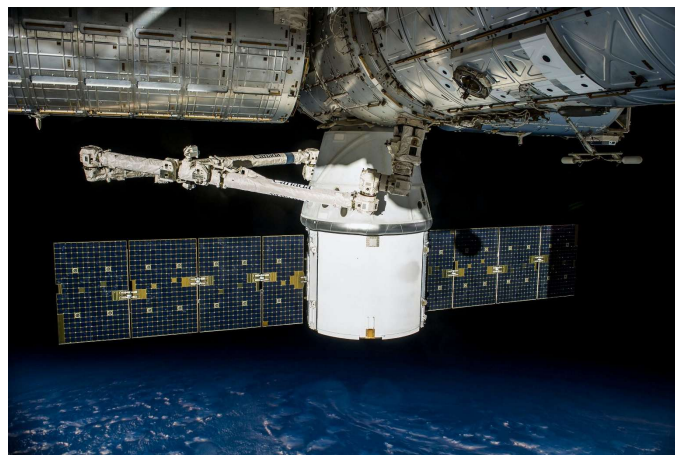
- Los módulos para los satélites se producirían en la Tierra y serían ensamblados y mantenidos en el espacio por robots.
- Una vez que los satélites captaran la energía solar, esta se convertiría en microondas (2.45 GHz o 5.8 GHz) y se transmitiría a la Tierra, donde antenas "rectificadoras" las transformarían en electricidad.
- Cada satélite proporcionaría unos dos gigavatios de energía, aproximadamente la misma cantidad que una central nuclear.
- Un panel solar en el espacio puede captar más energía que uno en la Tierra, ya que no tiene que lidiar con días/noches ni con el filtro atmosférico.

A. Prieto



55

55



• <https://www.weforum.org/stories/2022/11/solar-farms-in-space-electricity-to-earth-energy-climate-change/>

A. Prieto

56

56



• <https://www.nagase.com/discover/resources/xenomax-transforming-aerospace-solar-power/xenomax-advancing-thermal-reliability-in-solar-systems>

A. Prieto

57

57



<https://novosti-kosmonavtiki.ru/news/202439/>

A. Prieto

58

58

Conclusiones

A. Prieto

59

59

Conclusiones

- Efectos de las TIC en el consumo energético:
 - Primario
 - Secundario
 - Terciario o de rebote, debido al aumento de potencia de cálculo, y nuevas aplicaciones
- Se estima que desde 2012 los modelos de IA duplican cada 0,28 años (3,4 meses) la potencia computacional que utilizan, mientras que
 - La potencia de cálculo dobla cada 1,85 años
 - La eficiencia energética crece muchos más lentamente (dobla cada 2.29 años).
 - Hay establecidos hitos que hoy día son inalcanzables debido a las extraordinarias necesidades de computo y de energía requeridas.
- Debemos ser capaces de desarrollar algoritmos que requieran menos operaciones por bit de información útil, rompiendo la tendencia tradicional de la IA y las TIC, en general, de la "fuerza bruta" computacional. Hay que forzar al aprendizaje automático hacia técnicas que requieran menos coste computacional y más eficientes desde el punto de vista energético.

A. Prieto

60

60

... conclusiones ...

- La reducción del consumo de energía mejora la autonomía de la gran cantidad de dispositivos que utilizan baterías, como teléfonos inteligentes, dispositivos móviles y elementos del Internet de las Cosas
- El **consumo de energía** debe considerarse por ingenieros de computadores, ingenieros del software, desarrolladores de aplicaciones, profesores, etc. como una métrica de diseño fundamental, incluso por encima del rendimiento computacional y precisión de los resultados. "Diseño orientado a la reducción del consumo"
- Hay que ser conscientes de que el principal gasto energético no es el cálculo, sino el movimiento de los bits. Las arquitecturas de 2050 deberán ser radicalmente locales, procesando los datos donde se generan (Edge Computing).
- Para mantener el crecimiento digital es imperativo el desarrollo comercial de la fotónica de silicio, la óptica co-empaquetada (CPO) y soportes de almacenamiento pasivos que no requieran energía de mantenimiento.

A. Prieto

61

61

... Conclusiones.

- La sociedad debe estar informada de que el uso de las TIC (sea cual sea su forma), lleva implícito un consumo energético.
- **¡Todos debemos contribuir, desde nuestros respectivos ámbitos, al reto de lograr la sostenibilidad de nuestro planeta!**
Pegatinas (stickers) WhatsApp
 (50 KB) → 20.000 millones de WhatsApp día; 1 de cada 10, 4.000 Tm CO2 día; **1,46 millones de Tm al año**

24 OPINIÓN

Jueves 17.12.20
IDEAL

La contaminación silenciosa

ALBERTO PRIETO ESPINOSA
Academia de Ciencias de Granada

Todo proceso de transferencia o movimiento de datos, entre móviles, computadores, etc., consume energía, y muchos dispositivos, entre los que se encuentran los supercomputadores, están funcionando las 24 horas del día, siendo los consumos muy altos

Uno de los retos más importantes de la sociedad actual es reducir el consumo de energía con el objeto de mantener o hacer posible la sostenibilidad de nuestro planeta. Por hacer referencia a nuestro contexto, la Unión Europea tiene como una



y de los programas que es mucho mayor. Así, cuando enviamos un correo electrónico, además del consumo inherente a la transmisión de los bits hay que añadir el del programa que me permite editar, enviar, recibir y visualizar los emails. Hasta ahora los parámetros que se utilizaban para medir las prestaciones de un

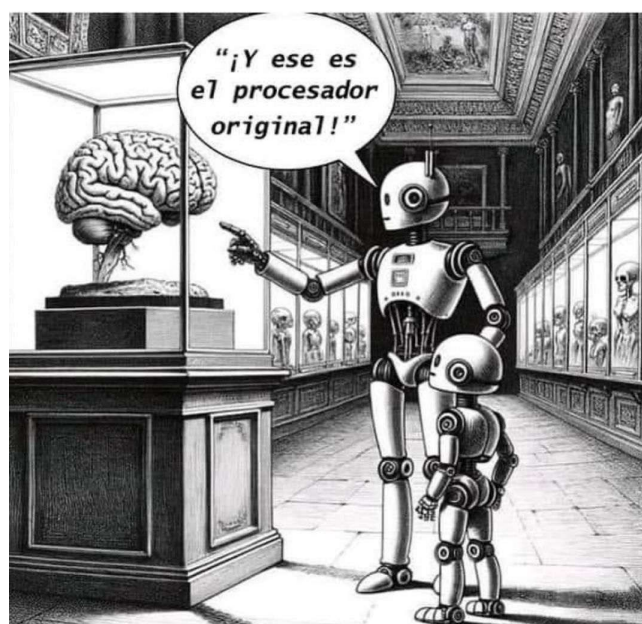
• A. Prieto. La contaminación silenciosa. Ideal, 17/12/2020, p. 24

A. Prieto

62

62

Lo que nos espera 😊



A. Prieto

63

63

Agradecimientos

- Deseo agradecer la colaboración de las siguientes personas en las investigaciones que estamos realizando sobre estos temas:

- Beatriz Prieto Campos
- Juan José Escobar
- Miguel Damas
- Antonio Díaz
- Christian Morillas
- Jesús González Peñalver
- Pablo García Sánchez
- Andrés Ortiz García
- Francisco Illeras

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

Proyectos **PID2022-137461NB-C31**, **PID2022-137461NB-C32**, y **PID2023-147409NB-C21** financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and by ERDF, "a way of making Europe".



- Juan Mari Prieto

A. Prieto

64

64

¡Muchas gracias por tu atención!

- Alberto Prieto Espinosa.

- Conferencias:

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

A. Prieto

