

Las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones como parte del problema y de la solución del consumo energético

Alberto Prieto
Departamento de Ingeniería de
Computadores, Automática y Robótica
Universidad de Granada
Granada
aprieto@ugr.es

Beatriz Prieto
Departamento de Ingeniería de
Computadores, Automática y Robótica
Universidad de Granada
Ceuta
beap@ugr.es

Resumen

En el presente trabajo se describe la contribución, tanto negativa como positiva, de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) en el incremento del consumo de energía eléctrica y, en consecuencia, sus efectos medioambientales. Se incluye un análisis sobre la evolución y las tendencias del consumo global de las TIC, se define el límite inferior teórico del coste energético del procesamiento por bit de información, y se presentan estimaciones del consumo medio real, tanto por procesamiento como por transmisión a través de redes de datos. También se enumeran los frentes abiertos para paliar el problema. Se hace hincapié en que, para contribuir beneficiosamente a reducir el aumento del consumo energético debe considerarse como parámetro fundamental la eficiencia energética y, al hacer los diseños y evaluaciones de los sistemas informáticos, no hay que centrarse sólo en el tiempo de ejecución, la precisión de los resultados y la comodidad de la interfaz de usuario. Es responsabilidad del profesorado universitario transmitir estos conocimientos y concienciar del problema a los futuros profesionales dentro de los planes de estudio y las materias correspondientes.

Abstract

This paper describes the contribution, both negative and positive, of Information and Communication Technologies (ICT) in increasing the consumption of electrical energy and, consequently, to its environmental effects. An analysis of the evolution and trends of global ICT consumption is included, the theoretical lower limit of the energy cost of processing per bit of information is defined, and estimates of the real average consumption are presented, both for processing and for transmission through of

data networks. The open fronts to alleviate the problem are also quoted. It is emphasized that, in order to contribute beneficially to reducing the increase in energy consumption, energy efficiency must be considered as a fundamental parameter and when designing and evaluating computer systems, not focus only on execution time, the precision of the results and comfort of the user interface. It is the responsibility of university teaching staff to transmit this knowledge and raise awareness of the problem among future professionals within the corresponding study plans and subjects.

Palabras clave

Eficiencia energética, consumo energético, Green Computing, computación verde, consumo energético en computación, consumo energético en transmisión de datos.

1. Motivación

La reducción del consumo de energía se ha convertido en uno de los mayores retos de la sociedad actual. En general, es desconocido que las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) constituyen uno de los principales ámbitos de consumo y los científicos, ingenieros y profesionales deben participar activamente en superar dicho reto.

Además de las razones medioambientales, la reducción del consumo energético tiene fuertes implicaciones económicas y además, mejora la autonomía de los numerosos dispositivos que utilizan baterías, como teléfonos inteligentes, dispositivos móviles y elementos de Internet de las Cosas.

La enseñanza universitaria no debe estar ajena a esta temática, y en las asignaturas de ingenierías tales como informática, telecomunicaciones y electrónica no hay que olvidar la inclusión de temas sobre diseño de hardware teniendo en cuenta, como una de

las especificaciones esenciales, la eficiencia energética, la evaluación del consumo energético de los programas de los computadores, y, en general, incluir siempre el consumo energético como un parámetro a considerar dentro de las prestaciones de los sistemas a desarrollar. No hay que limitarse a valorar sólo la precisión de los resultados, el tiempo de ejecución, la ocupación de memoria y una interfaz de usuario amigable y accesible, como tradicionalmente se viene haciendo.

La Informática Verde (*Green Computing*), también conocida como “TIC verde” o “TIC sostenible”, trata del diseño, la fabricación, el uso y la eliminación de los residuos de computadores, chips, otros componentes tecnológicos y periféricos de forma que se limite el impacto nocivo sobre el medio ambiente, incluida la reducción de las emisiones de carbono y de la energía consumida por los fabricantes, los centros de datos y los usuarios finales. La Informática Verde también abarca la elección de materias primas de origen sostenible, la reducción de los residuos electrónicos y el fomento de la sostenibilidad mediante el uso de recursos renovables [26].

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta un Análisis de la contribución de las TIC al consumo energético, la Sección 3 describe cómo afectan las TIC al medio ambiente, a continuación, se describen estimaciones efectuadas sobre el consumo medio de energía por bit, tanto en computación como en transmisiones a través de Internet (Sección 4). En la Sección 5 se recopilan diversos procedimientos que se están llevando a cabo para la reducción del consumo energético de las TIC; y el trabajo finaliza con unas conclusiones (Sección 6).

2. Análisis de la contribución de las TIC al consumo energético

Actualmente, uno de los retos más importantes de la sociedad es reducir el consumo energético para mantener o promover la sostenibilidad de nuestro planeta. Como ejemplo de este desafío, la Unión Europea (UE) se ha propuesto reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para 2030 [14]. La energía, necesaria para la gran mayoría de nuestras actividades, es una de las mayores fuentes de contaminación. La producción, el suministro y el consumo de energía generan en Europa el 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero. El Acuerdo Verde de la UE establece el objetivo de hacer que Europa sea climáticamente neutra para 2050.

En general, en la sociedad es desconocido el enorme impacto que presentan las TIC en las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por el consumo energético. Así, un informe coordinado por Victor Zhirnov y publicado por la Asociación de la

Industria de Semiconductores de EE. UU., en colaboración con la Corporación de Investigación de Semiconductores (SRC) y la Fundación Nacional de Ciencias (NFSF), afirma que, si bien la producción mundial de energía ha crecido linealmente, la demanda de electricidad de los computadores ha crecido exponencialmente [52]. Como se verá más adelante, en situaciones típicas, el nivel inferior de la energía requerida para el procesamiento de un bit se considera alrededor de 10^{-14} julios, que es la estimación utilizada para computadores portátiles y PCs, así como para supercomputadores. Una de las conclusiones del informe es que, si esta tendencia sigue aumentando, el consumo eléctrico de esta gran cantidad de equipos tecnológicos podría superar la producción eléctrica mundial para el año 2040 [1]; es decir, en dicho año no habría suficiente energía eléctrica para alimentar a todos los computadores del mundo [7]. En el peor de los casos, las TIC podrían contribuir con hasta el 23% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2030 [17, 41].

El incremento constante del consumo de energía por las TIC es debido a la gran proliferación de dispositivos electrónicos y aplicaciones que usamos constantemente bajo distintas formas tanto en tareas rutinarias, tales como ver la hora en nuestro teléfono inteligente, escuchar música o noticias de camino al trabajo, enviar correos electrónicos o mensajes a través de redes sociales, como en sistemas de cómputo tradicionales que van desde computadores personales (PC) hasta sistemas de cómputo de altas prestaciones (HPC). Ya en el 2014, cada minuto se enviaban en el mundo 38 millones de mensajes de WhatsApp, se visualizaban 266.000 horas de Netflix, 4,3 millones de vídeos en YouTube y se realizaban 3,7 millones de búsquedas en Google, según los datos de la compañía analítica Cumulus Media publicados en Visual Capitalist [11].

Por otra parte, constantemente surgen nuevos ámbitos de aplicación, como Internet de las Cosas (IoT), con nuevos dispositivos que, aunque individualmente sean de muy bajo consumo energético, dada su enorme cantidad su contribución global al consumo es muy significativa. La empresa Cisco propuso considerar que el nacimiento de IoT se estableciese cuando el número de dispositivos conectados [18] a Internet superase al número de habitantes total de la Tierra, hecho que ocurrió hacia finales del año 2008 (ver Figura 1).

En la Figura 2 pueden verse unos resultados de 2019 (*International Energy Agency*) basados en los trabajos de T. Barnett y colaboradores [2019] y de Cisco (2016) que muestran la evolución y previsiones del número global de dispositivos digitales (en miles de millones).

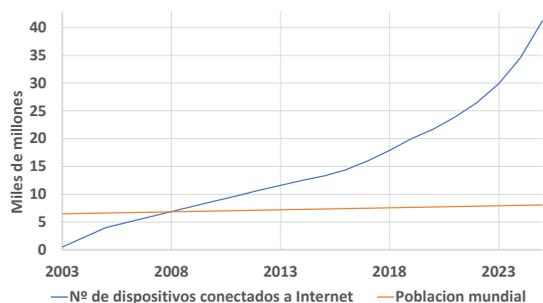


Figura 1: Evolución a lo largo de los años del número de dispositivos conectados a Internet y el de la población mundial (en miles de millones). (Los datos con los que se ha realizado la gráfica proceden de CISCO).

3. Cómo afectan las TIC al medio ambiente

Se puede afirmar que las TIC afectan el medio ambiente de tres formas posibles: efecto directo, efecto indirecto y efecto terciario.

El **efecto directo** es debido al panorama descrito en la sección anterior; es decir, al aumento global de los dispositivos, redes de transmisión y centros de datos conectados a Internet que está contribuyendo a una mayor participación del sector TIC en la emisión de gases de efecto invernadero. A pesar de la mejora constante en el rendimiento energético, la generalización del uso de los dispositivos personales de cómputo y el desarrollo de supercomputadores cada vez más potentes ha hecho que el consumo energético de las diversas aplicaciones de las TIC sea una parte importante del consumo mundial y constituya

una barrera esencial para el desarrollo de los supercomputadores y de los centros de procesamiento de datos.

El **efecto indirecto**, contrariamente al directo, es positivo para el medio ambiente y se debe al papel que las TIC están jugando como facilitadoras de la mejora de la eficiencia y la reducción del consumo primario de energía en muy diversos sectores como la construcción, la industria, el transporte y el comercio, al proporcionar soluciones inteligentes [28]. En otras palabras, el incremento del consumo de las TIC proviene en gran medida de su reducción en otros sectores, amortiguando, como balance total, el consumo global. De esta forma, es de suma importancia identificar las diferentes aplicaciones de las TIC en edificios, transporte e industria que redunden en una reducción del consumo energético. Como ejemplo, se puede citar que uno de los objetivos fundamentales marcados en los ámbitos de la domótica, ciudades inteligentes y de Internet de las Cosas, en general, es la reducción del consumo energético. Otro ejemplo, bien documentado, es el plan de automatización de la red de distribución de electricidad de la empresa *Delhi Power Limited* (NDPL) en India que redujo las pérdidas de energía del 54% a menos del 18% en 5 años [21]. Según datos de la iniciativa GeSI los dominios TIC que están consiguiendo mayores volúmenes de reducción de CO2 son los siguientes¹:

- E-salud
- E-enseñanza
- Redes eléctricas inteligentes
- Edificios inteligentes
- Agricultura inteligente
- Transporte privado interconectado
- Control y optimización de tráfico.

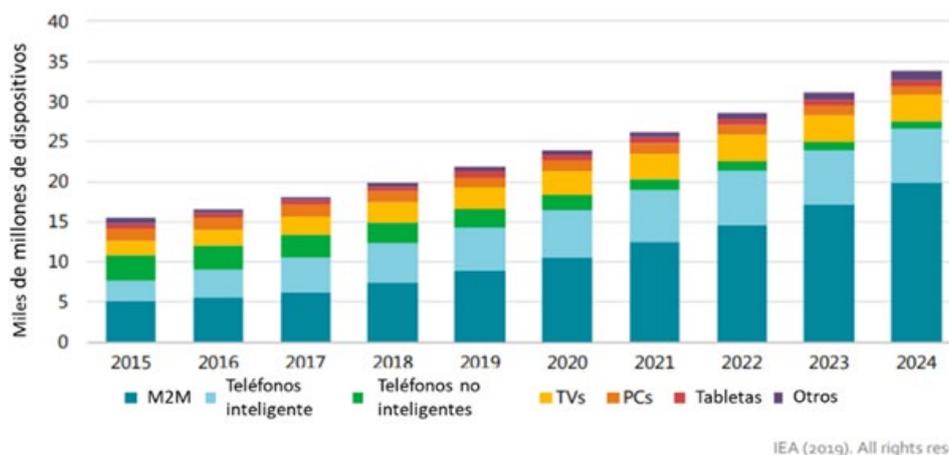


Figura 2. Previsiones realizadas en 2019 sobre la evolución global de dispositivos y conexiones TIC. (diagrama realizado en 2019 por la International Energy Agency con datos de Cisco y T. Barnet)

¹ Página web que muestra la reducción de emisiones en diversos países de CO2 en millones de toneladas, gracias a las TIC: <https://smarter2030.gesi.org/explore-the-data/>

- E-comercio
- E-bancario
- E-trabajo
- Fabricación inteligente
- Logística Inteligente.

El **efecto terciario**, resulta ser negativo, y se refiere a un fenómeno que ocurre a medida que los servicios de las TIC son más útiles, 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, lo que globalmente tiene una consecuencia negativa. Las estimaciones muestran que los posibles efectos de rebote debidos a la digitalización varían del 10% al 30% de mayor energía consumida, datos que varían según el sector, la tecnología y el uso final [18].

Conviene señalar que hay una multitud de artículos sobre las previsiones del consumo energético originado por las TIC. Estos estudios suelen referirse a países o grupos de países concretos y no son globales, y por lo general, utilizan modelos de regresión utilizando diversos parámetros, a veces muy reducidos, para hacer las previsiones. Por ejemplo, Hadlar [21] utiliza en su modelo de consumo de las TIC la penetración de Internet y el número de suscripciones de móviles en relación con los niveles de emisión de CO₂ por persona (Figura 3); es decir, no considera otros parámetros relevantes como número y tipos de dispositivos. Este estudio se circunscribe a 16 países de economía emergente (Argentina, Brasil, China, Colombia, Egipto, Grecia, Hungría, Indonesia, Malasia, Méjico, Pakistán, Perú, Polonia, Sur África, Tailandia y Turquía). Las conclusiones son de sumo interés sobre el consumo de este grupo de Estados en vías de desarrollo, en general. De la Figura 3a se deduce que en el periodo 2000 a 2018 los contratos de líneas de móviles superaron a la penetración de Internet. A partir del año 2000 tanto los teléfonos móviles como Internet aumentan de manera constante. Según la Figura 3b, las emisiones de CO₂ también muestran una tendencia creciente, pero la pendiente de esas emisiones es más suave en comparación con el uso de Internet y de dispositivos móviles. Esto indica que el CO₂ en los países emergentes aumenta a un ritmo más lento que el uso de las TIC.

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 in-

cluir otros parámetros como que la eficiencia energética de estos dispositivos es cada vez mejor. Confirman la anterior idea, análisis realizados a mediados de la década pasada que concluyeron que el crecimiento del consumo de energía alrededor de 2010 en países como Suecia, Alemania y EE. UU. [15, 16, 53, 57] estaba disminuyendo. Además, Andrae y Edler analizaron y modelaron el uso de energía eléctrica para las TIC en estudios separados en 2015 [1] y 2019 [2].

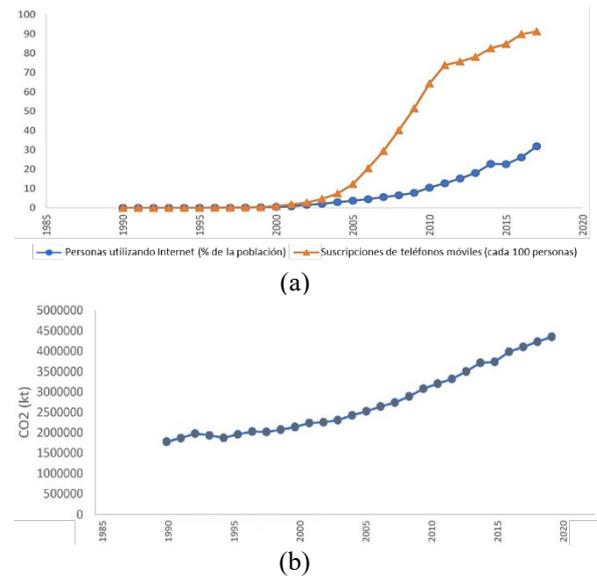


Figura 3: Tendencias, (a) del porcentaje de población que usa Internet y móviles celulares; (b) Emisiones de CO₂ (en kilotoneladas)

La Figura 4 muestra la evolución de la energía consumida por año (TWh) calculada con los datos de dichos estudios. Se puede observar que el consumo estimado de 2019 a 2030 es inferior a los resultados y expectativas de 2015.

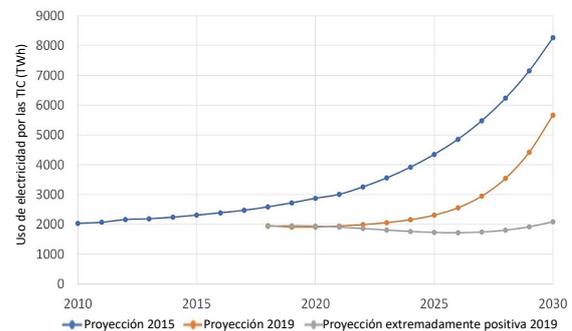


Figura 4. Proyecciones de Andrae y Edler sobre el uso de energía eléctrica por las TIC en TWh por año.

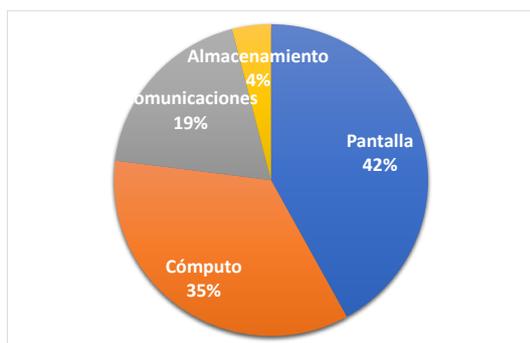
Como conclusión de esta sección, se puede decir que en esta era de revolución digital, las TIC juegan un papel central en casi todos los sectores de la eco-

nomía, y, por lo tanto, cualquier proyecto de envergadura para mitigar el cambio climático debe considerar actuaciones por un lado para disminuir la huella de carbono de las TIC, y, por otro lado, identificar e implementar recursos inteligentes proporcionados por estas mismas tecnologías que contribuyan a reducir la emisión en otros sectores

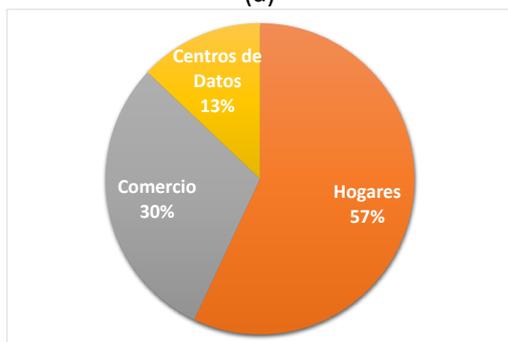
4. Consumo medio de energía eléctrica por bit

Una cuestión importante es estimar, lo más precisamente posible, el consumo global de energía debido a las TIC. Este tema se aborda en la presente sección.

En el año 2011 se estimaba que el consumo energético de las TIC se podría distribuir según las funciones a realizar de acuerdo como se muestra en la Figura 5a [47]. Por otra parte, la ubicación de los recursos se puede agrupar tal y como se muestra en la Figura 5b, poniendo de manifiesto que el consumo mayor se realiza en el conjunto de las viviendas (57%).



(a)



(b)

Figura 5: (a) Distribución del consumo de energía teniendo en cuenta: (a) las cuatro funciones básicas de los sistemas TIC, y (b) la ubicación de los equipos.

Los aspectos en los que más se puede incidir son en el de computación y en el de comunicación. Ligados a ellos, las primeras preguntas que surgen son: ¿se puede estimar la cantidad media de energía que

consume el procesamiento de un bit? ¿Cuánto se consume en su transmisión? En las siguientes secciones se trata de dar respuesta a las dos preguntas.

4.1. Volumen de computaciones

El uso de la informática está creciendo desmesuradamente y el número de instrucciones que se ejecutan por segundo crece permanentemente, tal y como se muestra en la Figura 6 [24]. Obsérvese que, según esta gráfica, en el año 2040 se llegará aproximadamente a una potencia de procesamiento de $\approx 5 \times 10^{22}$ MIPS (millones de instrucciones por segundo) una gran parte de los cuales ($\approx 5 \times 10^{19}$ MIPS) corresponderán a procesamiento de uso general.

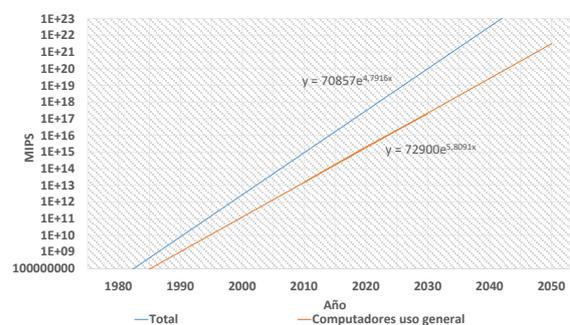


Figura 6: Tendencia en la capacidad de procesamiento en el mundo. (MIPS, millones de instrucciones por segundo).

Para obtener el consume medio por bit procesado, se puede partir, tal y como se hace en [51] del rendimiento binario (BTP, *binary throughput*) que representa el número 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 en [52], con un alto grado de precisión (coeficiente de determinación $R^2=0,98$), que $k \sim 3 \times 10^{10}$ and $r \sim 1.56$.

En la fórmula anterior no se tiene en cuenta la correlación que puede existir con la computación de uso específico (microcontroladores, procesadores gráficos, etc.), y en [52] se sugiere, para tenerlos en cuenta, multiplicar por 2 los valores obtenidos en la fórmula de cálculo de BTP.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y el número de segundos que tiene un año, se obtiene la Figura 7 que muestra la evolución del número de transiciones binarias (conmutaciones) que se efectuarán año a año.

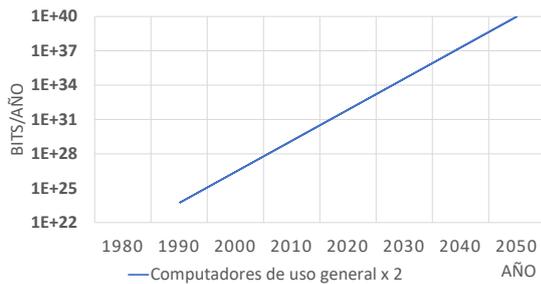


Figura 7: Evolución anual del número total de transiciones binarias requeridas para computación.

4.2. Consumo medio por el procesamiento y la transmisión de 1 bit

Una vez que conocemos el número medio de conmutaciones de bits, el problema se centra en conocer cuál es el consumo energético medio en la transformación de un bit. Para analizar esta cuestión, en primer lugar, se describe el Principio de Landauer (Sección 4.2.1) que establece un mínimo teórico, posteriormente se hace referencia a métodos y modelos de previsión (Sección 4.2.2), y por último (Sección 4.2.3) se presentan las proyecciones que establecen la Ley de Koomey.

4.2.1 Principio de Landauer

El objetivo marcado en el ámbito de la computación verde es reducir el consumo de las TIC, y esto se está tratando de realizar abordando el problema desde distintos frentes. Desde el punto de vista del consumo en el procesamiento, se puede plantear la siguiente pregunta ¿es posible teóricamente establecer un límite para el consumo energético mínimo de una computación elemental? La respuesta es afirmativa y el límite viene establecido por el principio de Landauer.

El principio de Landauer [32] deriva de la segunda ley de la termodinámica y del concepto del cambio de entropía asociado a la ganancia de información. Establece que cualquier manipulación lógicamente irreversible de la información, como en el borrado (desaparición) de un bit o cuando, por ejemplo, como consecuencia de un cálculo dos bits se combinan lógicamente para producir uno solo, se pierde parte de la información, lo que va acompañado del correspondiente aumento de entropía del sistema de procesamiento y de su entorno, que se considera como un sistema aislado.

Un proceso irreversible, en el contexto de la computación, es aquel en el que, al obtener la salida, perdemos la información de la entrada, no pudiéndola recuperar a partir de la salida. Por ejemplo, una operación de suma es irreversible ya que a partir de tan sólo el resultado no podemos

obtener los valores de los sumandos de entrada. Una puerta lógica NOT (inversor) en cambio sí se puede considerar una operación reversible porque a partir de la salida podemos determinar la entrada.

El principio de Landauer se puede deducir de la fórmula de la entropía de Boltzmann:

$$S = k_B \cdot \ln W$$

donde S es la entropía, $k_B \approx 1.38 \times 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann y W es el número de estados.

Como la entropía, suponiendo T constante, puede expresarse como $S = E/T$, donde E es la energía (calor disipado) y T es la temperatura del disipador de calor en grados, la expresión anterior resulta ser:

$$E = k_B \cdot T \cdot \ln W$$

La pérdida de energía (consumo) por bit procesado, se puede obtener teniendo en cuenta que en este caso hay $W=2$ estados posibles con lo que la energía asociada al procesamiento de 1 bit resulta ser:

$$E = k_B \cdot T \cdot \ln 2$$

Teniendo en cuenta que $\ln 2 \approx 0.69315$, y considerando una temperatura ambiente de $20^\circ\text{C} = 293,15$ K, se obtiene que el límite de Landauer representa aproximadamente una energía de 0.0175 eV ($2.805 \cdot 10^{-21}$ J) por bit desaparecido; es decir, $\approx 3 \cdot 10^{-21}$ J/bit.

4.2.2 Modelos y previsiones

Existen diversos estudios sobre modelos teóricos o experimentales que tratan de estimar la evolución en el tiempo del consumo medio de energía producida en el procesamiento de un bit. Así, en [12] se muestra (ver Figura 8), recopilando los resultados de diversos autores [36, 8], la evolución de energía del procesamiento de un bit, en julios, con respecto al tiempo.

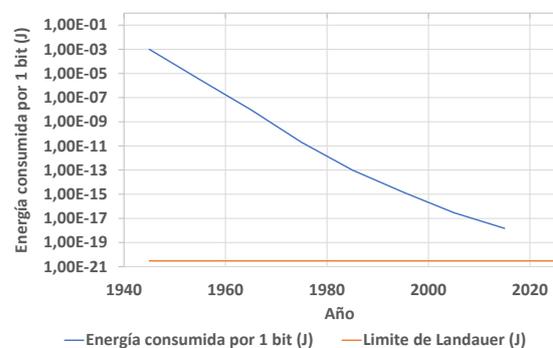


Figura 8. Estimación de la evolución del consumo de energía por bit a lo largo de los años.

Victor Zhirnov y colaboradores [60] publicaron años después (2014) un trabajo de sumo interés en el que presentan diversos modelos para estimar el consumo mínimo de energía de computación en sistemas informáticos. Así, obtienen de sus modelos y utilizando datos reales, la eficiencia energética de distintos elementos binarios (dispositivos lógicos y elementos de memoria) considerando la evolución del consumo de los transistores individuales y de los microprocesadores a lo largo del tiempo y de la dinámica de los procesos físicos que tienen lugar en los distintos componentes (efectos capacitivos, resistivos, etc.).

Concluyen que el gasto de energía total para computación está directamente relacionado con el número de transiciones/conmutaciones de los bits (Figura 7). La energía de una operación por bit, a nivel de un sistema, es una combinación de muchos componentes, como circuitos lógicos, módulos de memoria, interfaces, E/S, etc. (Figura 9), cada uno de los cuales contribuye significativamente al consumo global de energía. Zhirnov llega a la conclusión de que, en situaciones típicas, la energía mínima requerida por transición (conmutación) de un bit es de alrededor de 10^{-14} J/bit, siendo este cálculo utilizable para sistemas de uso general, incluyendo computadores portátiles y PC, así como supercomputadores.

Además, Victor Zhirnov en el artículo anteriormente citado, estima que en la práctica son posibles mejoras que pueden llegar a un límite inferior práctico para el consumo de energía a nivel de sistema, de aproximadamente $\sim 10^{-17}$ J/bit, que se puede considerar como un reto a conseguir.

De los análisis anteriores se puede llegar a la conclusión de que es de interés considerar tres valores para el consumo por bit en una conmutación o transición individual:

- Valor calculado a partir de datos reales (2014): $\approx 10^{-14}$ J/bit.

- Valor estimado por Zhirnov, como un objetivo a lograr $\approx 10^{-17}$ J/bit.
- Límite de Landauer $\approx 3 \cdot 10^{-21}$ J/bit.

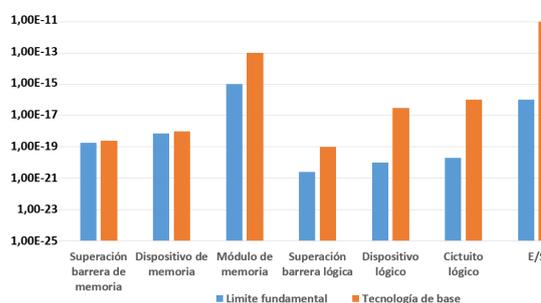


Figura 9. Resumen de la energía consumida por bit según diversos conceptos según el estudio de Zhirnov. de 2014.

Por otra parte, como se conoce la evolución a lo largo de los años del número de transiciones binarias requeridas por la computación (Figura 8), es posible obtener la evolución de la energía total requerida para la computación a lo largo de los años, y sus resultados se muestran en la Figura 10 para los tres supuestos mencionados [52]. Según se indica en esta figura, el consumo de energía por los computadores no será sostenible a partir del 2040 ya que a partir de esa fecha la energía requerida para la informática superaría la producción estimada de energía mundial. Por lo tanto, se necesita una mejora radical en la eficiencia energética de los equipos informáticos.

4.2.3 La Ley de Koomey

La Ley Moore [45] fue desarrollada en 1965 por Gordon Moore, cofundador y presidente emérito de Intel, en la que se establece que la densidad de integración de los transistores en un chip aproximadamente se duplica, , cada dos años. Y esto

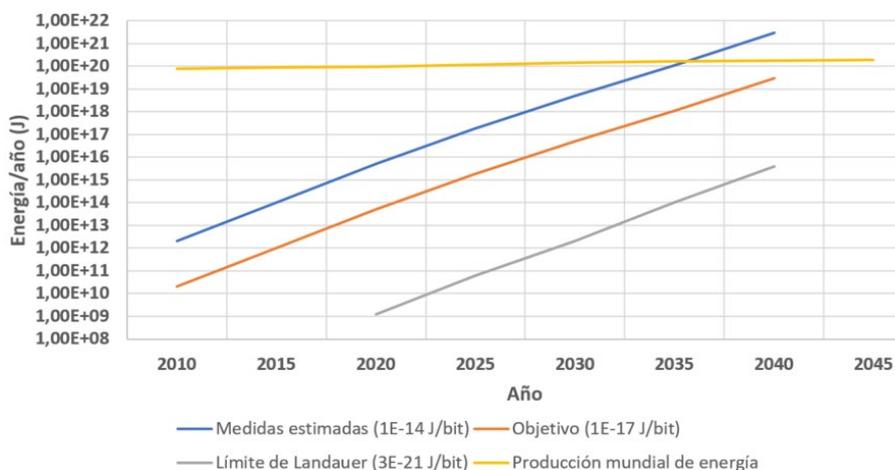


Figura 10. Evolución a lo largo del tiempo de la energía total requerida para computación.

se ha cumplido durante décadas. Como ejemplo, cuando se proclamó la Ley de Moore sólo se integraban 2.250 transistores en un espacio de 12 mm², mientras que en la actualidad se incluyen más de cien millones de transistores en un sólo milímetro cuadrado.

Pero la Ley de Moore tiene un límite; en efecto, los procesos de fabricación ya están en los 5 y 7 nm y está previsto alcancen hasta los 2 nm; pero llegará un momento en el que las dimensiones serán tan pequeñas que los principios de la física clásica, en los que se basa el desarrollo de la nanoelectrónica, dejarán de cumplirse y, si se quiere avanzar en la miniaturización, habrá que desarrollar otro tipo de circuitos de distinta naturaleza.

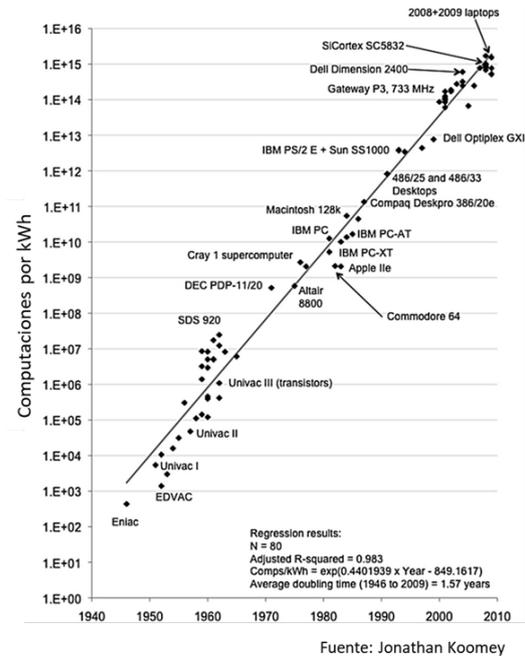
Desde el punto de vista del consumo de energía, la Ley de Koomey² [38, 37] (2010) establece la tendencia de la eficiencia energética del procesamiento por computadores, estimando que el número de computaciones por julio de energía disipada se dobla aproximadamente cada 1,57 años. Esta Ley se cumplía con una gran precisión ($R^2=98\%$) con datos tomados entre los años 1946 y 2009. Al año siguiente de enunciarse esta ley (2011) el propio Koomey hizo una rectificación indicando que, a partir de 2010, preveía que la eficiencia energética de duplicaría cada 2,6 años. La diferencia entre estas dos tasas de crecimiento es sustancial: duplicarla cada año y medio da como resultado un aumento de 100 veces en la eficiencia cada década, mientras que duplicarla cada dos años y medio produce un aumento de la eficiencia de 16 veces.

Por la segunda ley de la termodinámica y el principio de Landauer, la eficiencia energética de la computación irreversible no puede seguir mejorando para siempre. Suponiendo que la eficiencia energética de la informática siguiera duplicándose cada 2,6 años, y tomando la referencia de Zhirnof de 2014, el límite de Landauer se alcanzará en 2036. Por lo tanto, después de este año, la ley de Koomey ya no podría cumplirse. El principio de Landauer, sin embargo, no limita la eficiencia de la computación reversible. Esto, junto con otras tecnologías informáticas más allá de CMOS, podría permitir seguir avanzando en la eficiencia.

La Figura 11 muestra la evolución prevista a lo largo del tiempo de la energía consumida por cada operación de cómputo para una operación individual (pJ) en los que se basó Koomey para hacer sus previsiones [38].

Hay que tener en cuenta que el Límite de Landauer se establece para las computaciones irreversibles. En el caso de computaciones reversibles (en las que no se pierde información), como es el caso de la computación cuántica, se debe utilizar como límite

inferior del consumo energético el establecido por el Teorema de Margolus–Levitin que marca como límite de la eficiencia energética $6 \cdot 10^{33}$ operaciones por segundo por julio de energía. Este límite, aplicando la Ley de Koomey, se alcanzaría aproximadamente dentro de unos 125 años.



Fuente: Jonathan Koomey

Figura 11 Computaciones por kWh, de 1946 a 2009, resultados obtenidos por Koomey y en los que se basa su ley.

4.3. Consumo de energía en la ejecución de instrucciones

Los datos de la sección anterior se refieren a valores medios estimados del consumo energético de procesamiento, normalizados a 1 bit, considerando globalmente distintos tipos de operaciones. Pero también resulta de interés conocer el consumo energético de los distintos tipos de instrucciones del código máquina. A continuación, se hace referencia fundamentalmente a instrucciones en coma flotante (float-point instructions) de 64 bits que son las que consumen mayor energía y las más utilizadas en sistemas de computación de altas prestaciones (supercomputadores).

Dan McMorro coordinó un estudio de sumo interés sobre las implicaciones tecnológicas del paso de la supercomputación de 1 Petaflop (10^{15} flops) a 1 Exaflop (10^{18} flops) [43]. Este estudio analiza la contribución del paso de una escala de potencia de cálculo a otra, para satisfacer los requisitos computacionales asociados al plan del Departamento

² <http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2011/Landauer>

de Energía (DOE) para la Administración Nacional de Seguridad Nuclear (NNSA) de los Estados Unidos. Para la NNSA, el objetivo principal es el uso de la computación de altas prestaciones en apoyo a la investigación y desarrollo en temas fundamentales como la física de la fusión nuclear.

Una cuestión a tener en cuenta es que la ejecución de una instrucción tiene asociada dos consumos, uno inherente a la operación a realizar y otro al tránsito de la información, en forma de corriente eléctrica, por los conductores (pistas de interconexión, dentro de los chips o en las placas de circuito impreso).

Es bien conocido que al transitar una señal eléctrica por un conductor de resistividad ρ , longitud L y superficie de la sección transversal S , se produce una pérdida energética en forma de calor. La resistencia eléctrica asociada al conductor es:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Denotando con E la energía, P la potencia, v la tensión eléctrica, t el tiempo e i la corriente eléctrica, la energía disipada resulta ser:

$$\begin{aligned} E &= P \cdot T = v(t) \cdot i(t) \cdot t = i(t)^2 \cdot R \cdot t \\ &= \rho \cdot i(t)^2 \cdot t \cdot \frac{L}{S} \end{aligned}$$

Es decir, cuanto mayor es la distancia (L) entre los dispositivos que se interconectan y menor es la superficie (S) de la sección del conductor tanto mayor será la energía consumida (E). Por ejemplo, transmitir una palabra de 64 bits a una distancia de 1 mm dentro del chip consume energéticamente aproximadamente 8 pJ/mm.

En la Figura 12, adaptada de [34], se muestra el coste energético de varias operaciones básicas, medidas en picoJulios (10⁻¹² J). Las barras azules representan el coste energético en 2012, mientras que las barras rojas representan el coste energético estimado para estas operaciones en 2020. Por ejemplo, una operación de coma flotante de doble precisión requería en 2012 unos 25 pJ de energía y baja hasta tan sólo unos 4 pJ en 2020, debido a la reducción del tamaño de los elementos internos de los microprocesadores. Los consumos de acceso a los registros son incluso menores, y los de acceso a una SRAM de 8 kB son comparables. Esto se debe a que estas operaciones tienen lugar cerca de las unidades funcionales del procesador y la memoria SRAM se construye con transistores y está diseñada para un acceso rápido, aunque tienen una densidad baja en relación con la DRAM.

Obsérvese también que, mientras que para 2020 se logra una reducción de seis veces en el consumo de energía para las operaciones de coma flotante, para

la comunicación a través del chip la mejora es más modesta, el doble. Por último, existe una gran disparidad entre el coste energético del cálculo en coma flotante y el acceso a la memoria externa al chip. En 2012, un acceso a la DRAM, con palabras de 64 bits, requería 1,2 nJ, y en 2020 se reduce a 4 veces (320 pJ). La relación del coste energético entre el acceso a la memoria y el cálculo de coma flotante en 2020 se estima del orden de 80 a 1.

Aunque el coste energético de las operaciones individuales parece bastante modesto, se vuelve sustancial cuando se contempla la construcción de un ordenador a exaescala. Así, por ejemplo, una tasa de utilización de energía de 1 pJ=10⁻¹² J implicaría en un computador exaescala (10¹⁸ instrucciones/s):

$$P = 10^{-12} \cdot 10^{18} = 10^6 W = 1 MW$$

Es decir, resulta un consumo muy elevado. A mayor potencia de cálculo, mayor potencia energética requerida.

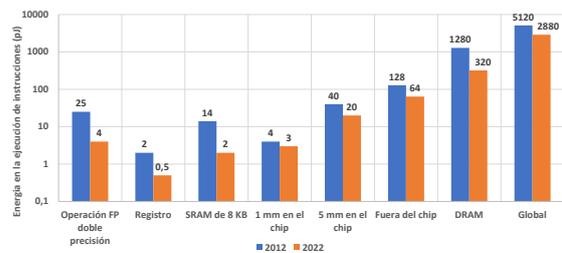


Figura 12. Coste de energía, en picojulios (pJ) en la ejecución de distintos tipos de instrucciones con datos en coma flotante de 64 bits.

Hemos realizado un estudio de la eficiencia energética de los primeros supercomputadores de todas las listas del Green500 y se han obtenido los resultados que se muestran en la Figura 13. A partir de los datos anteriores y teniendo en cuenta el rendimiento de procesamiento y que las instrucciones operan con datos de 64 bits se obtiene el consumo energético por bit procesado (Figura 14).

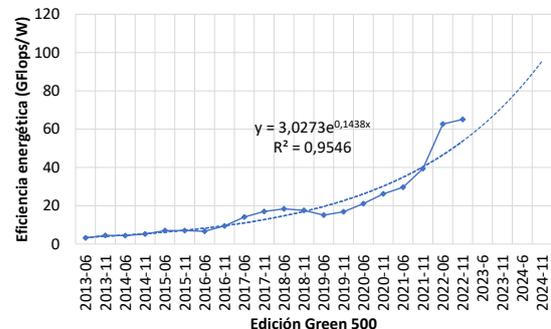


Figura 13. Evolución de la eficiencia energética (Flops/W) del primer supercomputador de las listas del Green500 a lo largo de los años.

4.4. Consumo de energía en el tráfico por Internet

Para tener una visión más completa del consumo energético producido por las TIC hay que considerar el provocado por la comunicación de datos, y más concretamente por Internet [25]. Se estima que en el año 2022 el tráfico total por Internet fue de unos 35 Zettabits, habiéndose incrementado 2,5 veces el flujo obtenido cinco años antes (2018)³ [9]. Dada la gran cantidad de bits transmitidos, la energía consumida es considerable, pero, globalmente se estima que es la mitad de la de procesamiento.

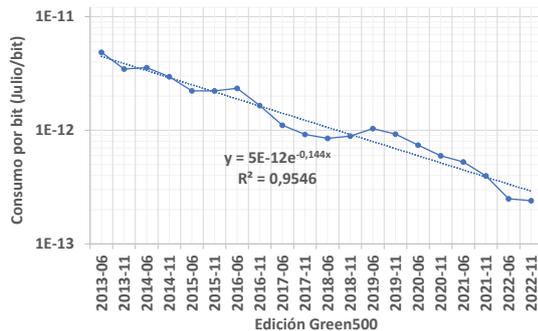


Figura 14. Evolución del consumo por bit del primer supercomputador de las listas del Green500 a lo largo de los años.

Es difícil establecer el consumo energético medio de transmisión de un bit a través de Internet, ya que este depende de muy diversos factores tales como:

- El canal de transmisión (atmósfera, cable, fibra óptica, etc.)
- La distancia entre emisor y receptor. [10].
- El caudal de datos (velocidad de transmisión). [35, 48].
- En el caso de un mensaje transmitido, el consumo depende además de factores tales como codificación utilizada, tipo de modulación, [10] etc.

En [3] se estima que el consumo de electricidad debido a la transmisión de datos a través de Internet evoluciona de acuerdo con la Figura 15, donde en el eje y se muestra el consumo energético (Julios/bit) en escala logarítmica y en el eje x el año. Otras estimaciones han dado un valor de $2,7 \cdot 10^{-5}$ J/b para 2015 con datos del Reino Unido. De la figura se deduce que el consumo por bit se reduce a la mitad aproximadamente cada dos años. Esta tasa de mejora es un poco más rápida que la tendencia histórica posterior al año 2000 en la eficiencia energética de la computación observadas por Koomey y Naffziger

(2015, 2016) que indicaba una reducción a la mitad cada 2,6 años (Sección 4.2.3).

Se puede concluir que 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 aproximadamente $2,8 \cdot 10^{11}$ veces mayor que la del procesamiento de un bit (10^{-17} J/b), si se tienen en cuenta las estimaciones de Zhirnov o de $2,6 \cdot 10^7$ veces mayor si se tiene en cuenta el rendimiento energético de los supercomputadores ($7,4 \cdot 10^{-13}$ J/bit).

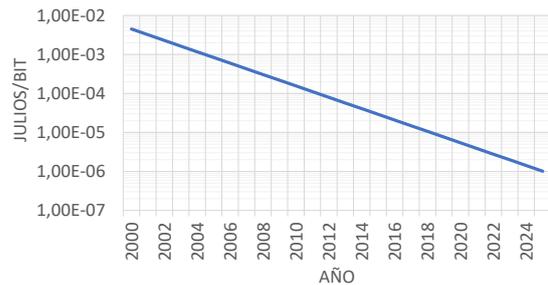


Figura 15. Estimación de la energía consumida por bit transmitido a través de una red de datos.

5. Procedimientos de reducción del consumo energético de las TIC

Afortunadamente las previsiones más pesimistas sobre el consumo energético asociado a las TIC no se están cumpliendo, siendo su incremento menor que el esperado. Ello es debido a que 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. Entre esas acciones se encuentran: [53, 42]:

A. Mejoras tecnológicas en los componentes electrónicos y dispositivos. Conforme se incrementa el número de dispositivos y el uso de sistemas TIC, adquiere una mayor relevancia el aumento de la eficiencia energética de los circuitos integrados, ya que estos son unos de los elementos de mayor consumo. De esta forma, en las últimas décadas el consumo energético de los procesadores ha sido un factor clave a considerar en la propuesta de nuevas microarquitecturas. Ejemplos de actuaciones relevantes en este ámbito son los siguientes [6, 50, 46]:

- Cambios de los dispositivos y de la arquitectura interior de los microchips. Por ejemplo, IBM ha

³ <https://www.statista.com/statistics/267202/global-data-volume-of-consumer-ip-traffic/>

desarrollado un prototipo de circuito integrado que hace posible apilar verticalmente los transistores [27] formando así lo que se podrían denominar circuitos integrados 3D [49]. Esto hace posible que, además de la capacidad de incrementar la densidad de transistores, reducir el consumo de energía (se estima que hasta un 85% menos).

- Inclusión de funciones de gestión de energía dentro de las CPU y de otros circuitos complejos que, con el objeto de optimizar el consumo de electricidad y 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, con los que se puede predecir y controlar mejor su consumo energético. Este es el caso, por ejemplo, de las unidades de procesamiento gráfico (GPU) y de las unidades de procesamiento tensorial (TPU).
- Uno de los orígenes de pérdidas de energía en forma de calor se encuentra en las fuentes de alimentación conmutadas, que transforman la corriente alterna (AC) de la red a los niveles de corriente continua (DC) requerido por los circuitos de los equipos informáticos. Se está investigando en nuevos materiales semiconductores, como el nitruro de galio y el carburo de silicio, que permiten diseñar fuentes de conmutación a frecuencias más altas que las tradicionales, generando así menos pérdida de calor que las basadas en componentes de silicio. [51].
- Se está investigando en la integración directa en los chips de sistemas de refrigeración con microfluidos, que sustituyan a los ventiladores externos que consumen mucha más energía [58].
- Otro enfoque en el que se está trabajando muy activamente es el de computación neuromórfica. El objetivo es desarrollar hardware que emule el cerebro, ya que éste es un sistema de procesamiento de la información con un alto grado de plasticidad y es uno de los más eficientes energéticamente ya que consume una potencia de unos 25 vatios (menos de la mitad de un PC portátil) disponiendo de 86.000 millones de elementos de computo (neuronas) [23].
- Se han producido también mejoras muy importantes en la tecnología de otros dispositivos que componen un computador. Este es el caso, por ejemplo, del cambio de la tecnología de los discos rígidos móviles (*Hard Disk Drive, HDD*) a los de circuitos semiconductores (USB flash drives o a los *Solid State Drive, SSD*) lo que ha provocado una reducción del consumo de energía superior al 50% en los sistemas masivos de almacenamiento de datos [5].

B. Gestión y planificación del uso de los recursos. Se trata de utilizar los distintos sistemas disponibles tratando de reducir el consumo energético global. Entre otras posibilidades se encuentran:

- A nivel de las unidades que configuran el computador, hacer entrar en los modos de suspensión o de espera a los recursos que en un momento dado no sean necesarios. Entre estos recursos se encuentran, procesadores (núcleos), memorias caché, módulos de memoria RAM, discos, tarjetas de interfaz de red, etc. También este criterio puede seguirse a mayor escala, así en los centros de datos se puede reducir el consumo de energía conectando eléctricamente sólo los servidores que sean imprescindibles y apagar los no utilizados o ponerlos en modo de bajo consumo [22].
- En general, el consumo de los microchips se incrementa con la tensión de alimentación y con la frecuencia de funcionamiento. Se trata de, dentro de lo posible, 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. Estas técnicas de regulación se denominan escalado dinámico de la tensión y de la frecuencia (*Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS*)
- Otra forma de reducir la huella de carbono producida por las TIC es ejecutar, en lo posible, las aplicaciones dentro de las zonas horarias donde la producción de energía eléctrica procedente de fuentes limpias es mayor, como pueden ser los intervalos de tiempo donde es elevada la producción eólica debido al viento u horas donde la radiación solar es mayor. En esos intervalos de tiempo, denominados “horas valle”, las empresas suministradoras de electricidad reducen notablemente los precios [56]. Este concepto es denominado “tarifa con discriminación horaria” [19]. Si las aplicaciones se ejecutan en horas valle se obtiene un doble beneficio, por una parte, se reduce el coste económico de la energía necesaria para la ejecución de los programas, y por otra, se favorece el uso de las energías alternativas. Existen países que suministran digitalmente, en tiempo real, el precio de la energía suministrada, de forma que es posible combinar esta información con el lanzamiento a ejecución de las aplicaciones.
- También se buscan tecnologías más eficientes para reducir el impacto ambiental en las fases de diseño y fabricación de equipamientos TIC [6].

C. Cambios de escala, buscando en cada caso la plataforma de cómputo más eficiente: computador de altas prestaciones (computación en la nube), servidor, computador personal, sistemas móviles o pequeños microcontroladores en redes de sensores [40]. El concepto de cambio de escala (escalado) está relacionado con el **endoso computacional** (*offloading*), según el cual 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 [61].

- 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 (calculadoras, teléfonos, despertadores, radios, planificadores, etc.), y que ahora pueden ser realizados por un dispositivo simple diseñado para un consumo de energía óptimo [41]. Hay investigadores que aseguran que la proporción de electricidad de los dispositivos de consumo disminuirá y se transferirá a las redes y centros de datos.
- 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. Hay que tener en cuenta que, en muchos casos, una asignación eficiente de recursos requerirá el rediseño de las aplicaciones y de los algoritmos. Así, en los sistemas distribuidos, los algoritmos y los procesos deben migrarse o endosarse a los recursos más eficientes energéticamente. Desde el punto de vista energético, el endoso de programas o aplicaciones no debe hacerse a una plataforma que acelere más la aplicación, sino a una que tenga mayor eficiencia energética, siempre condicionado a satisfacer los requisitos de tiempo [50]. Por otra parte, en el endoso de programas hay que estimar también el consumo debido al movimiento de datos a través de las redes de comunicaciones de acuerdo con las estimaciones que se han realizado en la Sección 4.4. En general, el consumo de electricidad por parte de los dispositivos informáticos se transferirá ventajosamente a las redes y centros de datos, donde se puede realizar una mejor gestión de los recursos energéticos [1]; pero hay que tener en cuenta que, en general, el endoso computacional solo es beneficioso cuando se requiere gran volumen de computación con relativamente poca cantidad de comunicación [39].

- Unificación o transformación de centros de datos pequeños o medianos a otros mucho mayores que podrían denominarse centros de hiperescala (como Google Cloud, Amazon Web Services, Microsoft Azure, OVHCloud, o Rackspace Open Cloud). En los centros hiperescala el consumo de energía se puede gestionar mucho mejor [40]. 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 hiperescala en lugares donde las condiciones climáticas sean 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 [20]. También para reducir el consumo de climatización, el Proyecto Natick de Microsoft está probando la viabilidad de colocar centros de datos bajo el agua, cerca de las comunidades costeras [44]. Este proyecto implica sumergir 864 servidores en un contenedor similar a un submarino que será alimentado por una combinación de energía renovable en tierra cercana, incluida la energía solar y eólica.

6. Conclusiones

Se estima que en el año 2030 las tecnologías de la información consumirán aproximadamente el 13% de la electricidad mundial [4], y para 2050 el de los centros de datos será unas tres veces mayor que la cantidad total de energía generada en Japón [33]. Ya en 2015 Facebook y Google respectivamente procesaban 20 y 25 petabytes de datos diariamente [59, 55]. El almacenamiento de datos, por otra parte [5] alcanzaría en el año 2025 los 163 zettabytes [54].

La reducción del consumo energético en el ámbito de las TIC es una cuestión trascendental, y debe ser afrontada desde muy distintos ámbitos, y la enseñanza debe ser uno de ellos. Así, es fundamental que en los planes de estudio de las asignaturas relacionadas con las TIC (Ingeniería Informática, Ingeniería Electrónica, e Ingeniería de Telecomunicaciones) se incluyan materias relacionadas con el consumo energético para que nuestros estudiantes tomen conciencia del problema y conozcan distintas políticas y técnicas para realizar los diseños y aprovechar los recursos de la forma más eficiente posible desde el punto de vista energético [13]. El consumo energético debe considerarse como una medida de prestaciones tan importante como lo puede ser el rendimiento computacional de los diseños de los circuitos, arquitecturas, programas y aplicaciones.

Los graduados en las TIC deberían conocer procedimientos y herramientas que permitan caracterizar la potencia y la energía consumida según las características del código a ejecutar. Por otra parte, en las publicaciones científicas y técnicas debería incluirse información sobre la eficiencia energética de los sistemas. En los programas de computador, se ha convertido en una medida de prestaciones tan importante como la velocidad de procesamiento, si bien no suele considerarse en las publicaciones que incluyen información sobre la eficiencia de los programas. Por un lado, están las razones medioambientales y económicas, pero también la necesidad de mejorar la autonomía de los dispositivos que utilizan baterías.

En los currícula de IEEE/ACM para los estudios de grado de Computer Science [30] y Computer Engineering [29] se hace referencia en muy diversas asignaturas a contenidos relacionados con el consumo energético. Entre las materias que incluyen este tema se encuentran los cursos de Lógica Digital y Sistemas Digitales, Componentes Digitales y Diseño; Técnicas para funcionamiento en bajo consumo, Mantenimiento, sostenibilidad y fabricación, y Fundamentos de Electrónica. En la asignatura de Sostenibilidad se describe el impacto medioambiental de las decisiones de diseño de sistemas de cómputo relacionadas con los algoritmos, los sistemas operativos, las redes, las bases de datos etc. En la introducción del área de conocimiento de Arquitectura y Organización [31] se indica claramente que las prestaciones elevadas o la viabilidad de que una aplicación pueda ejecutarse en un computador no sólo está relacionada con restricciones en el tiempo de ejecución, sino también con el consumo de energía. Más detalles pueden verse en [13].

Todos debemos contribuir, desde nuestros ámbitos respectivos, al reto de lograr la sostenibilidad de nuestro planeta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y por fondos FEDER a través de los proyectos PGC2018-098813-B-C31 y PGC2018-098813-B-C32. También se agradece la colaboración de los profesores de la Universidad de Granada Antonio Díaz, Juan José Escobar y Miguel Damas.

Referencias

[1] 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>

[2] 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.

[3] 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.

[4] M. Avgerinou, P. Bertoldi y L. Castellazzi. (2017). Trends in data centre energy consumption under the european code of conduct for data centre energy efficiency. *Energies*, 10(10), 1470. <https://doi.org/10.2760/358256>

[5] E. Borba, E. Tavares, P. Maciel (2022). A modeling approach for estimating performance and energy consumption of storage systems. *Journal of Computer and System Sciences*, 128, 86-106.

[6] F. Bordage. (2019). The environmental footprint of the digital World. GreenIT: France. https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/11/GREENIT_EENM_etude_EN_accessible.pdf

[7] A. Burgess, T. Brown. 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.

[8] R. K. Cavin, V. V. Zhirnov, D. J. C. Herr, A. Avila and J. Hutchby, *J. Nanopart. Res.* 8, 841 (2006)

[9] Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022.

[10] S. Cui, A. J. Goldsmith y A. Bahai. (2005). Energy-constrained modulation optimization. *IEEE transactions on wireless communications*, 4(5), 2349-2360.

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

[12] A. Despotuli y A. Andreeva. (2009). A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies. *International Journal of Nanoscience*, 8(04n05), 389-402. DOI: 10.1142/S0219581X090006328

[13] A. Díaz, J. Lopera, J. J. Escobar, M. A. López, J. González y M. Damas, M. (2017). Consumo de energía y asignaturas de arquitectura y tecnología de computadores. Enseñanza y aprendizaje de ingeniería de computadores: *Revista de Experiencias Docentes en Ingeniería de Computadores*, (7), 79-92.

- [14] European Commission, 2030 climate & energy framework. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- [15] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. Information and communication technologies consume 15% less electricity due to improved energy efficiency. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2015/20151210-gabriel-studie-strombedarf-ikt.html> (2015).
- [16] 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>.
- [17] C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair, A. Friday. The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations. arXiv preprint arXiv:2102.02622. (2022).
- [18] GeSI. Global e-Sustainability Initiative. Accenture strategy SMARTer2030-ICT solutions. (2015) https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- [19] A. Gonzalez, J. R. Riba, A. Rius y R. Puig. (2015). Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Applied energy*, 154, 752-762.
- [20] Google Data Centers. Hamina, Finland. A White Surprise. <https://www.google.com/about/datacenters/locations/hamina/>
- [21] A. Haldar y N. Sethi. (2022). Environmental effects of Information and Communication Technology-Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111754.
- [22] N. Hamdi, C. Walid. A survey on energy aware VM consolidation strategies. *Sustain. Comput. Inform. Syst.* 2019, 23, 80–87. [CrossRef]
- [23] S. Herculano-Houzel. (2009) The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in human neuroscience*, 31.
- [24] M. Hilbert y P. Lopez, “The world's technological capacity to store, communicate, and compute information,” *Science* 332 (2011) 60-65
- [25] K. Hinton, J. Baliga, R. Ayre y R. S. Tucker. (2009, July). The future Internet-An energy consumption perspective. In 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference (pp. 1-2). IEEE.
- [26] 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%20centers](https://www.ibm.com/cloud/blog/green-computing#:~:text=Green%20computing%20(also%20known%20as,consumed%20by%20manufacturers%2C%20data%20centers)
- [27] IBM (2021). IBM and Samsung Unveil Semiconductor Breakthrough That Defies Conventional Design (2021). <https://newsroom.ibm.com/2021-12-14-IBM-and-Samsung-Unveil-Semiconductor-Breakthrough-That-Defies-Conventional-Design>
- [28] IEA. International Energy Agency (2017) Digitalization & Energy Report. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>
- [29] IEEE/ACM Computer Engineering Curricula 2016: <http://www.acm.org/education/curricula-recommendati>
- [30] IEEE/ACM Computer Science Curricula 2013: <http://www.acm.org/education/curricularecommendations>.
- [31] IEEE/ACM Computer Science Curricula 2013: <http://www.acm.org/education/curricularecommendations>.
- [32] R. Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal of research and development*, 5(3), 183-191.
- [33] N. Iimura, N. Nishikawa, M. Nakano y M. Oguchi. (2015, January). A proposal of storage power control method with data placement in an environment using many hdds. In *Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication* (pp. 1-8).
- [34] S.W. Keckler, W.J. Dally, B. Khailany, M. Garland y D. Glasco. Gpus and the future of parallel computing. *Micro, IEEE*, 31(5):7–17, 2011.
- [35] I. Kelényi, J. K. Nurminen, Á. Ludányi y T. Lukovszki. (2012). Modeling resource constrained BitTorrent proxies for energy efficient mobile content sharing. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 5(2), 163-177.
- [36] L. B. Kish. (2006). Thermal noise driven computing. *Applied Physics Letters*, 89(14), 144104.
- [37] J. Koomey, S. Naffziger. (2015). Moore’s Law might be slowing down, but not energy efficiency. *IEEE spectrum*, 52(4), 35.

- [38] J. Koomey, S. Berard, M. Sanchez y H. Wong. (2010). Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 46-54.
- [39] K. Kumar, Y. H. Lu. (2010) Cloud computing for mobile users: Can offloading computation save energy? *Computer*, 43, 51–56.
- [40] D. Landré, J. M. Nicod y V. Christophe. (2020). Optimal standalone data centre renewable power supply using an offline optimization approach. *Sustain. Comput. Inform.*, 34, 100627.
- [41] J. Malmodin y D. Lundén. (2018). The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027.
- [42] M. Manganelli, A. Soldati, L. Martirano, S. Ramakrishna. (2021). Strategies for improving the sustainability of data centers via energy mix, energy conservation, and circular energy. *Sustainability*, 13(11), 6114.
- [43] D. McMorrow. (Abril 2013). Technical Challenges of Exascale Computing, JSR-12-310, JASON, MITRE Corporation.
- [44] Microsoft, Proyecto Natick, <https://natick.research.microsoft.com/>
- [45] G. E. Moore. (1965): Cramming more components into integrated circuits. Archivado el 6 de octubre de 2014 en Wayback Machine., artículo en inglés en la revista *Electronics*, volumen 38, n.º 8; 19 de abril de 1995
- [46] A. S. Mutschler. (2021). Designing Low Energy Chips and Systems. *Semiconductor Engineering*, February 1st. <https://semiengineering.com/designing-for-low-energy/>
- [47] B. Nordman y S. Lanzisera (2011, Enero). Electronics and network energy use: Status and prospects. In 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) (pp. 245-246). IEEE.
- [48] J. K. Nurminen. (2010) Parallel connections and their effect on the battery consumption of a mobile phone. In Proc. of 7th IEEECCNC, Las Vegas, USA
- [49] V. F. Pavlidis y E. G. Friedman. (2009). Interconnect-based design methodologies for three-dimensional integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 97(1), 123-140.
- [50] B. Prieto, J. J. Escobar, J. C. Gómez-López, A. F. Díaz y T. Lampert. (2022). Energy Efficiency of Personal Computers: A Comparative Analysis. *Sustainability*, 14(19), 12829.
- [51] 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).
- [52] Semiconductor Industry Association and the Semiconductor Research Corporation, Rebooting the IT Revolution: A Call 547 to Action. (2015). <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/RITR-WEB-version-FINAL.pdf>.
- [53] A Shehabi, S Smith, D Sartor, R Brown, M Herrlin, J. G. Koomey, E.R. Masanet, N. Horner, I.L. Azevedo, W. Lintner. (2016) United States Data Center Energy Usage Report. Berkeley Lab. <https://eta.lbl.gov/publications/unitedstates-data-center-energy>.
- [54] S. Singhal, P. Sharma, R. K. Aggarwal y V. Passricha. (2018). A global survey on data deduplication. *International Journal of Grid and High Performance Computing (IJGHPC)*, 10(4), 43-66.
- [55] J. Tai, B. Sheng, Y. Yao y N. Mi. (2014, Marzo). Live data migration for reducing sla violations in multi-tiered storage systems. In 2014 IEEE International Conference on Cloud Engineering (pp. 361-366). IEEE.
- [56] W. Tushar, C. Yuen, D. H. Smith y H. V. Poor. (2016). Price discrimination for energy trading in smart grid: A game theoretic approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(4), 1790-1801.
- [57] B. Urban, V. Shmakova, B. Lim, K. Roth. (2014). Energy Consumption of Consumer Electronics in US Report to the CEA. Fraunhofer USA Center for Sustainable Energy Systems: Boston, MA, USA.
- [58] T. Wei. (2020). A cool design for hot microchips. *Nature*, 585(7824), 188-189.
- [59] S. Yin, X. Li, K. Li, J. Huang, X. Ruan, X. Zhu, ... Y X. Qin. (2015, September). Reed: A reliable energy-efficient raid. In 2015 44th International Conference on Parallel Processing (pp. 649-658). IEEE.
- [60] 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.