

El cuerpo humano como fuente de energía de sistemas electrónicos portables o vestibles

Dr. Rafael E Gonzalez-Landaeta, Dra. Amanda Carrillo Castillo y Dr. Christian Chapa González

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez





La demanda de dispositivos electrónicos portables o vestibles ha aumentado considerablemente en el último lustro, lo cual se debe al desarrollo de dispositivos de entretenimiento y dispositivos que monitorean la salud. Esto repercute en una creciente necesidad de fuentes de energía que garanticen un funcionamiento continuo de esos dispositivos portables o vestibles. Las baterías recargables o secundarias suelen ser las fuentes que se usan con mayor frecuencia, las cuales deben adaptarse, no solo al tamaño y ergonomía del dispositivo, sino que deben ser capaces de proveer energía por largos periodos de tiempo y soportar un gran número de ciclos de carga y descarga. Esto conlleva a un agotamiento paulatino de la vida útil de cualquier batería, hasta el punto de que, en algunos casos, es necesario desechar tanto la batería como el dispositivo que la contiene; un ejemplo de ello son los teléfonos móviles y los relojes inteligentes. Esto tiene un impacto ambiental preocupante, sobre todo porque para el 2030 se pronostica una cantidad de desechos industriales de decenas de millones de toneladas métricas en todo el mundo [1].

Existen fuentes de energía alternativas conocidas como “verdes” o renovables. Entre las más conocidas están la energía solar, la energía eólica y la energía geotérmica, de las cuales se puede generar energía eléctrica en el orden de las unidades de MW. Aunque las fuentes de energía renovables han demostrado su capacidad para sustituir las energías convencionales, no todas son aptas para ser implementadas en dispositivos electrónicos portables por razones de portabilidad. La única excepción son las celdas solares, que hoy en día pueden generar decenas de mW usando estructuras flexibles de un tamaño tan reducido que pueden ser incorporadas en sistemas vestibles y en sistemas implantables [2]. En ese sentido, surge la pregunta: además de las energías renovables presentes en el ambiente ¿qué otra fuente de energía renovable se puede usar para producir energía eléctrica de forma portable? La respuesta es: energía generada por el cuerpo humano.

En los seres vivos, la unidad mínima portadora de energía es la molécula de trifosfato de adenosina, conocida como ATP por sus siglas en inglés. El ATP no proviene directamente de los nutrientes en sí mismos, sino que se sintetiza en las mitocondrias de las células gracias a procesos *metabólicos*, tales como la glucólisis, la oxidación de ácidos grasos o el ciclo de Krebs, en los cuales los nutrientes como carbohidratos, grasas y proteínas se aprovechan para producir ATP. En un mol de ATP, por ejemplo, se pueden liberar unos 30.5 kJ. Considerando que la cantidad total de ATP en el cuerpo humano es de 0.2 mol (6 kJ), esto equivale al 60% de la energía de una batería alcalina AA (10 kJ), por lo que, a priori, el ATP no parece muy atractivo si solo se piensa en alimentar a dispositivos inteligentes, pero puede ser una gran opción para alimentar, por ejemplo, a un reloj electrónico convencional, el cual no consume más de 1 μ W.

La principal fuente de energía para las funciones fisiológicas proviene de los azúcares simples como la glucosa, en donde 1 gramo de glucosa aporta 15.8 kJ. Además, el cuerpo humano puede almacenar grandes cantidades de energía en la grasa. Por ejemplo, 1 gramo de grasa almacena una energía equivalente a los 37.7 kJ [3], esto quiere decir que un hombre adulto de 70 kg con 12% de grasa corporal puede almacenar unos 317 MJ (3 veces más que un galón de gasolina). Aunque desde esta perspectiva suena muy interesante esta comparación, es importante señalar que el cuerpo humano usa gran parte de esa energía para llevar cabo las actividades físicas y los procesos fisiológicos diariamente. Por poner un ejemplo, una persona adulta consume 70 kcal por hora (81 W) mientras duerme, y 1,400 kcal por hora mientras corre (1,628 W). Si tan solo se pudiese recolectar una pequeña fracción de la energía que almacena el cuerpo humano, se puede considerar la posibilidad de alimentar a un sistema electrónico cuyo consumo de potencia sea reducido. Un reloj inteligente o smartwatch, por ejemplo, consume 1 mW, lo que equivale al 0.0001% de la energía que el cuerpo consume en una carrera de larga distancia (1,628 W). Esto puede sonar tentador a primera vista, pero con solo imaginar que para encender un smartwatch por unos segundos hay que correr durante una hora, desanimaría hasta al más entusiasta.

Con la cantidad de energía que se almacena en un gramo de grasa no es descabellado pensar en recolectar energía directamente desde dicha reserva de combustible; sin embargo, con la tecnología actualmente disponible, es una tarea que resulta muy difícil hoy en día, por no decir imposible. A pesar de eso, el cuerpo humano se considera una inmensa fábrica de conversión de energía. Una parte de la energía alma-

cenada en el cuerpo humano se consume, pero otra parte se libera en distintas formas de energía, estas son: energía térmica, energía mecánica y energía química. El cuerpo humano consume energía para realizar funciones físicas y fisiológicas, tales como, caminar, dormir, digerir alimentos, respirar, etc., por lo que no se puede recolectar. En cambio, la energía liberada se puede aprovechar de distintas formas para convertirla energía eléctrica.

Para mantener la temperatura corporal, el cuerpo consume grandes cantidades de energía. Mientras una persona está sentada, el cuerpo consume unas 100 kcal por hora (116 W), en cambio, una persona nadando puede consumir unas 500 kcal por hora (582 W) [4]. La energía que no se consume se libera en forma de calor que se intercambia entre el cuerpo y el ambiente, y otra parte de la energía se libera a través de la respiración y el sudor. Dependiendo de la actividad, el cuerpo puede disipar entre 60 W y 180 W [5]. Ese calor liberado puede aprovecharse para transformarlo en energía eléctrica mediante unos recolectores conocidos como sensores Seebeck o termopares. En términos muy simples, un termopar es un sensor compuesto por dos uniones o caras. Si dichas uniones o caras se encuentran a distintas temperaturas, se produce una tensión eléctrica; mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre ambas caras, mayor será la tensión eléctrica generada. En algunas investigaciones se ha reportado que cuando la temperatura de la piel es de 37 °C y la temperatura ambiental varía entre 15 °C y 27 °C, es posible generar entre 5 mW y 0.5 mW [6], respectivamente, usando termopilas que contienen termopares conectados en serie o en paralelo. Estos niveles de potencia generada son suficientes para alimentar a una calculadora de bolsillo o, incluso, hasta algunos monitores de gluco-

sa [7]. Aunque las termopilas suelen ser una solución para producir notables cantidades de energía a partir del calor corporal, su tamaño no siempre es adecuado para incorporarlas en sistemas portables y vestibles. Para efectos de reducir el tamaño del dispositivo, se han propuesto generadores termoeléctricos flexibles, TEG, por sus siglas en inglés, que tienen densidades de energía de unos 3.8 mW·cm⁻², y que pueden adherirse a la piel de una persona como si fuesen un parche de nicotina. Un problema de recolectar energía térmica del cuerpo se presenta cuando la temperatura del ambiente es igual o menor a la temperatura de la piel, en ese escenario los recolectores no generan energía eléctrica, ya que no se cumpliría la Segunda Ley de la Termodinámica, Ecuación 1, la cual describe que la entropía del universo (S) se incrementa en cualquier fenómeno físico o químico. ¿Qué pasaría si el flujo de energía ocurriese desde el recolector frío hacia la piel “caliente”? Entonces, se predeciría que la *entropía* disminuiría, lo cual sencillamente es imposible.

$$\Delta S = dq \left(\frac{1}{T_{\text{frío}}} - \frac{1}{T_{\text{caliente}}} \right) > 0 \quad (1)$$

Además de la energía térmica, la naturaleza dinámica del cuerpo humano lo convierte en una importante fuente de energía mecánica. Desde la respiración y el latido cardiaco en situación de reposo, hasta correr un maratón de 42 km, el cuerpo genera movimientos que pueden ser aprovechados para producir energía eléctrica. Los músculos del cuerpo humano realizan dos tipos de trabajos durante el movimiento: el trabajo positivo y el trabajo negativo. Durante el trabajo positivo, los músculos generan energía para iniciar el movi-

miento, mientras que, durante el trabajo negativo, los músculos absorben energía para detener el movimiento. Cuando se desea recolectar energía biomecánica (energía mecánica proveniente del cuerpo humano), es imprescindible adherir recolectores al cuerpo. Independientemente de su naturaleza, dichos recolectores deben cumplir con una condición: no aumentar el costo metabólico durante el movimiento. Esto quiere decir que cuando se adhiere un recolector al cuerpo humano, el sujeto no debería ejercer un esfuerzo adicional para recolectar energía. Dicho esto, para valorar a un recolector de energía biomecánica, se ha propuesto un término conocido como costo de recolección (COH, por sus siglas en inglés) [8], el cual está definido por la Ecuación 2,

$$COH = \frac{M_{\text{con recolector}} - M_{\text{sin recolector}}}{P} \quad (2)$$

en donde M el costo metabólico y P la potencia eléctrica a la salida del recolector.

El COH se considera una figura de mérito de los recolectores de energía biomecánica, por lo que, mientras menor sea el COH, mejor es el recolector. Para reducir el COH, diversos autores han encontrado que es mejor recolectar energía durante el trabajo negativo de los músculos en lugar de hacerlo durante el trabajo positivo [9]; si a esto se le suma el hecho de reducir la masa del recolector de energía, el COH se reducirá mucho más. Otros autores también han podido demostrar que mientras más cerca esté el recolector del centro de masa del cuerpo (ubicado entre el ombligo y la cadera), el COH se reduce considerablemente.

La mayoría de los trabajos que buscan recolectar la energía biomecánica se centran en aprovechar movimientos durante la marcha; entre los cuales están, el movimiento de brazos y piernas, el movimiento de las articulaciones, el movimiento del centro de masa del cuerpo, y el golpe de cada pie contra el suelo. Cada uno de estos movimientos tiene sus propias particularidades. Por ejemplo, el movimiento de brazos y piernas es muy similar al de un péndulo simple, el centro de masa se mueve hacia arriba y hacia abajo siguiendo el patrón de una onda sinusoidal, y el golpe del pie contra el suelo es muy similar a una señal tipo impulso. Las características de cada movimiento se aprovechan para transformarlas en energía eléctrica, para lo cual se han propuesto distintos recolectores de energía. Entre los más usados están, los electromagnéticos, los piezoeléctricos, los electrostáticos y los triboeléctricos. Los recolectores electromagnéticos generan gran cantidad de energía, pero su tamaño y masa no son apropiados para aplicaciones portables y, además, suelen aumentar el COH. Por su parte, los recolectores piezoeléctricos, electrostáticos y triboeléctricos, generan menor cantidad de energía, pero gracias a los avances en la ingeniería de materiales, estos se han desarrollado en forma de películas delgadas que se adaptan fácilmente a la anatomía del cuerpo, garantizando, no solo confort mientras se usan, sino un costo metabólico insignificante. En ese sentido, se han propuesto recolectores adheridos a las piernas, a los brazos, incluso a las plantillas de los zapatos, todo esto con el fin de recolectar energía durante la marcha o durante una carrera. También se han propuesto aditamentos, como mochilas, que tienen incorporados recolectores que aprovechan el movimiento vertical del centro de masa del cuerpo para generar energía mientras se usa la mochila. Con propuestas de este tipo se han llegado a generar decenas de Watts durante la marcha, una cantidad de

potencia suficiente como para alimentar a un monitor portable de la frecuencia cardiaca.

Otra fuente de energía que se encuentra disponible en el cuerpo es la energía química (o bioquímica). Actualmente, es posible generar energía eléctrica a partir de algunos fluidos biológicos como la sangre, las lágrimas y el sudor, siendo el sudor el que más se ha explorado, ya que se puede acceder a él desde la superficie de la piel. Aunque lo mismo sucede con las lágrimas, estas se presentan con menos frecuencia que el sudor. El sudor contiene diversos metabolitos, como son el lactato, la urea, la glucosa, el ácido úrico, etc. Para recolectar energía a partir del sudor, se utilizan unos recolectores conocidos como pilas de biocombustibles, BFC, por sus siglas en inglés, las cuales captan algunos metabolitos y, mediante reacciones químicas, son capaces de producir electrones. De todos los metabolitos, el lactato se considera un combustible muy atractivo debido a su eleva-

da concentración en el sudor en comparación con la glucosa [10].

Dentro de los avances en el área de recolección de energía bioquímica, se han podido conseguir densidades de potencia de $3.5 \text{ mW}\mu\text{cm}^{-2}$ a partir del lactato presente en el sudor mediante parches que se adhieren a la superficie de la piel. También se han desarrollado BFCs que aprovechan las concentraciones de glucosa en la sangre, alcanzando densidades de potencia de hasta $1.4 \text{ mW}\mu\text{cm}^{-2}$ [10]. El inconveniente con estas BFCs es que se deben aplicar procedimientos invasivos para acceder a la sangre. Aunque la glucosa también está presente en el sudor, su concentración es mucho menor a la de la sangre, por lo que la energía eléctrica generada es menor.

En la Figura 1 se muestra la densidad de potencia de algunos recolectores de energía usados en el cuerpo

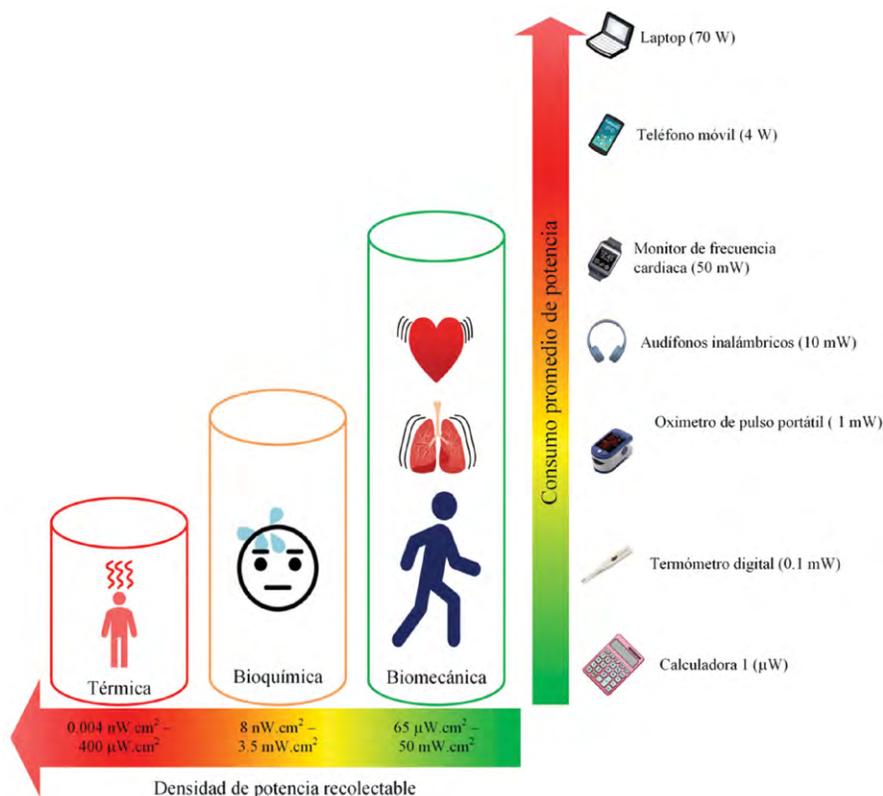


Figura 1. Relación entre la densidad de potencia de algunos recolectores de energía y el consumo de potencia de algunos dispositivos portátiles y vestibles.

humano, y el consumo promedio de algunos dispositivos portables. Si bien es cierto que el cuerpo humano es una gran fábrica de energía, existen diversas limitaciones a la hora de alimentar a sistemas electrónicos portables o vestibles, una de ellas es que la energía que proviene del cuerpo humano es intermitente, con excepción de la energía térmica. En el mundo de los dispositivos electrónicos portables, es importante garantizar la autonomía del sistema por varias horas. Ante la escasa energía que se puede recolectar, es imperativo contar con dispositivos que almacenen la energía recolectada. Los más comunes son las baterías, pero también están los supercondensadores, los cuales almacenan grandes cantidades de energía en un tamaño tan reducido como el de una moneda de 1 peso mexicano; sin embargo, estos dispositivos de almacenamiento suelen ser rígidos y, en el caso de las baterías, a medida que su capacidad en amperios por hora aumenta, mayor es su tamaño. Aunque se han propuesto baterías y supercondensadores flexibles con densidades de energía similares a sus contrapartes rígidas, actualmente, los costos de producción son muy elevados. Además del tamaño y de la flexibilidad, otro factor que se debe considerar es la compatibilidad con los tejidos del cuerpo, sobre todo si se considera usar este tipo de dispositivos durante varias horas al día.

Para poder prescindir de baterías en el uso de sistemas portables electrónicos, no basta con solo recolectar un cantidad determinada de energía. Hay que impulsar áreas orientadas al desarrollo de circuitos electrónicos de ultra-bajo consumo, de sistemas de gestión de ener-

gía y de dispositivos de almacenamiento de energía que se adapten a las necesidades que demanda el paradigma portable y vestible. Aún está lejos contar con una infraestructura que permita la comercialización de sistemas portables y vestibles sin baterías, ya que son muy elevados los costos de investigación y desarrollo (I+D) que requieren [11], y las empresas no vislumbran a corto plazo una demanda importante de esta de tecnología. Este panorama es muy distinto al mercado de recolección de energía ambiental, donde se vislumbra una tasa de crecimiento anual del 9.8% para el 2028, y cuyo crecimiento se ve más acentuado en países como Estados Unidos, Alemania, Australia y Reino Unido [12].

Muchos investigadores realizan esfuerzos en diversas áreas de la ingeniería y las ciencias biológicas para reducir el uso de baterías en sistemas portables y vestibles aprovechando las bondades que brinda el cuerpo humano como fuente de energía. Dentro de esos esfuerzos, se suman las contribuciones científicas que realizan los grupos de investigación BIOCIM, ByNEF y Nanomedicina de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) quienes, desde las áreas de instrumentación electrónica, ingeniería de los materiales y nanotecnología, han realizado aportaciones importantes en este campo y han conseguido proponer tecnologías vestibles capaces de prescindir del uso de baterías [13].

Entropía: es una medida de la cantidad de desorden o aleatoriedad en un sistema físico, y está relacionada con la dispersión de la energía térmica en ese sistema.

Metabolitos: compuestos químicos producidos como resultado de la actividad de las enzimas en las células. Pueden ser nutrientes, productos de desecho o moléculas utilizadas en funciones celulares específicas.

Referencias:

- [1] I. Tiseo. (2024, 02/09/2024). Projected electronic waste generation worldwide from 2019 to 2030. Available: <https://www.statista.com/statistics/1067081/generation-electronic-waste-globally-forecast/>
- [2] J. Zhao, R. Ghannam, K. O. Htet, Y. Liu, M. k. Law, V. A. Roy, et al., "Self-Powered implantable medical devices: photovoltaic energy harvesting review," *Advanced healthcare materials*, vol. 9, p. 2000779, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.202000779>.
- [3] G. Rebel, F. Estevez, P. Gloesekoetter, and J. M. Castillo-Secilla, "Energy harvesting on human bodies," in *Smart Health: Open Problems and Future Challenges*, Edited by: A. Holzinger, C. Röcker and M. Ziefle. Springer, pp. 125-159, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16226-3_6
- [4] T. Starner, "Human-powered wearable computing," *IBM systems Journal*, vol. 35, pp. 618-629, 1996. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0618>
- [5] A. Cicchella, "Human Power Production and Energy Harvesting," *Encyclopedia*, vol. 3, pp. 698-704, 2023. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0618>
- [6] V. Leonov, "Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 2284-2291, 2013. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2252526>
- [7] P. Gljušćić, S. Zelenika, D. Blažević, and E. Kamenar, "Kinetic energy harvesting for wearable medical sensors," *Sensors*, vol. 19, p. 4922, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19224922>.
- [8] M. Liu, F. Qian, J. Mi, and L. Zuo, "Biomechanical energy harvesting for wearable and mobile devices: State-of-the-art and future directions," *Applied Energy*, vol. 321, p. 119379, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119379>.
- [9] Y. Zou, L. Bo, and Z. Li, "Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system," *Fundamental Research*, vol. 1, pp. 364-382, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.05.002>.
- [10] L. Manjakkal, L. Yin, A. Nathan, J. Wang, and R. Dahiya, "Energy autonomous sweat-based wearable systems," *Advanced Materials*, vol. 33, p. 2100899, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202100899>.
- [11] L. Yin and J. Wang, "Wearable energy systems: what are the limits and limitations?," *National Science Review*, vol. 10, p. nwac060, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac060>.
- [12] (2023, 02/15/2024). Sistemas de recolección de energía Análisis de tamaño y participación del mercado tendencias y pronósticos de crecimiento (2023 - 2028). Available: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/energy-harvesting-system-market>
- [13] O. Mendez-Lira, E. M. Spinelli, and R. Gonzalez-Landaeta, "Battery-Less Power Management Circuit Powered by a Wearable Piezoelectric Energy Harvester," *Energy Technology*, vol. 9, p. 2100520, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202100520>.