

Los MOF: materiales a la medida
para hacer frente a los desafíos
del siglo xxi

La simplicidad
en la ciencia:
de Newton
a SpaceX

La biotecnología detrás
de la nanotecnología
dermatológica

Cuando la ingeniería trasciende las aulas • Las plantas: fábricas químicas de metabolitos secundarios • ¿Y si tu maquillaje pudiera adaptarse a ti? • Scooters: 100 años de un vehículo a gran velocidad • Con sangre, sudor y lágrimas • El héroe que todos ocupamos alguna vez • El estado del arte de la computación cuántica y el impacto en la encriptación moderna • Endometriosis: La lucha contra el sufrimiento femenino • La IA más allá de tus tareas



CON SANGRE, SUDOR Y LÁGRIMAS

INGRID SOFÍA RINCÓN VON PASTOR
Ingeniería Mecatrónica, 9.º semestre

Hace más de 80 años, Winston Churchill usó la frase “Con sangre, esfuerzo, sudor y lágrimas” para describir el sacrificio que sería necesario durante la Segunda Guerra Mundial. Con el tiempo, la palabra “esfuerzo” desapareció de la expresión popular, pero hoy en día los investigadores nos traen de vuelta esta palabra con una tecnología que literalmente funciona con sangre, sudor y lágrimas (además de otros fluidos corporales) con un objetivo muy diferente: mejorar la calidad de vida de las personas.

Esta tecnología son las celdas de combustible bioquímicas (Biofuel Cells o BFC, por sus siglas en inglés). Se trata de dispositivos electroquímicos capaces de transformar la energía química de compuestos orgánicos, como la glucosa, en electricidad mediante reacciones catalizadas por enzimas o microorganismos. Dependiendo del catalizador de la reacción, estas celdas se pueden clasificar en dos grandes grupos: enzimáticas y microbianas (Ferrari *et al.*, 2022; Kižys *et al.*, 2023).

Aunque existen diferencias entre los distintos tipos de BFC, todas comparten el mismo principio de funcionamiento. Al igual que una batería convencional, tienen un polo negativo (ánodo), en el que ocurre una reacción de oxidación, y un polo positivo (cátodo), donde se lleva a cabo una reacción de reducción. En la oxidación, ya sea por la acción de enzimas o bacterias, se liberan electrones (Jiao *et al.*, 2024). Estos viajan por un circuito externo hasta llegar al cátodo, produciendo así una corriente eléctrica y generando energía. Para poder llevar a cabo estas reacciones es necesario tener un electrolito, pero en vez de utilizar soluciones químicas inorgánicas como

las baterías alcalinas o las de plomo, estas celdas utilizan fluidos corporales, como sangre, sudor, lágrimas, saliva e incluso la orina. Es importante añadir que estas celdas no son lo mismo que una batería; no pueden almacenar energía, solo generarla (Ferrari *et al.*, 2022; Kižys *et al.*, 2023).

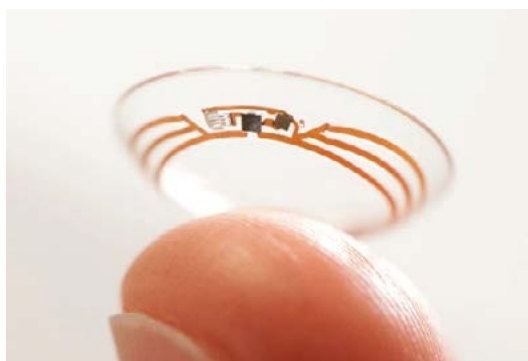


Figura 1. Propuesta de lentes de contacto inteligentes de Google que utilizan tecnología de BFC.
Fuente: Otis (2016).

Dependiendo de qué lleva a cabo las reacciones químicas, se pueden obtener resultados muy diferentes. Las celdas enzimáticas, como se puede asumir, utilizan enzimas aisladas como catalizadores. Gracias a su alta especificidad, estas celdas tienden a responder rápidamente y alcanzan mayores densidades de potencia. Solo que también tienen una de las mayores limitaciones: una muy corta vida útil. Como las enzimas se desnaturalizan, pierden actividad y dejan de realizar las reacciones de la misma forma en muy poco tiempo (Minteer *et al.*, 2007). Por otro lado, las celdas microbianas emplean bacterias para metabolizar los compuestos orgánicos. Utilizan procesos, como la respiración celular, para transferir electrones a la membrana o superficie del ánodo, donde se aprovechan para generar



electricidad. Aunque tienden a producir una menor potencia que las celdas enzimáticas, ofrecen una mayor estabilidad a largo plazo, tienen una vida útil más larga, e incluso se ha probado conectar varias de estas en serie para incrementar el voltaje y la corriente generados (Aiyer, 2020; Ferrari *et al.*, 2022).

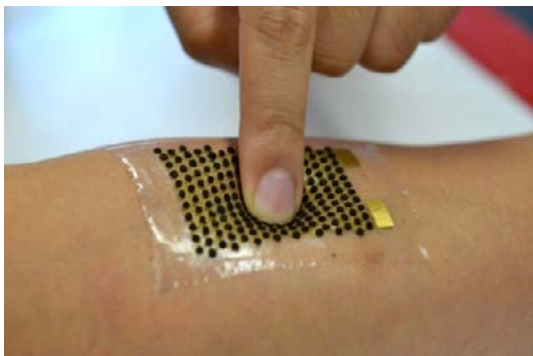


Figura 2. BFC wearable a base de sudor desarrollada en la UCS.

Fuente: Keane (2017).

Las aplicaciones más prometedoras de estas celdas bioquímicas se encuentran en el ámbito médico, donde pueden aprovechar sustancias que el propio cuerpo ya produce para alimentar pequeños dispositivos electrónicos. Uno de los proyectos más conocidos fue desarrollado por Johnson & Johnson en colaboración con Google. En este intentaron crear lentes de contacto inteligentes capaces de medir la glucosa presente en las lágrimas y así ayudar a pacientes con diabetes a llevar el registro de su glucosa sanguínea (Otis, 2016). Aunque el proyecto fue cancelado en 2018 debido a la dificultad de relacionar la glucosa lagrimal con la glucosa en la sangre, investigaciones similares continúan desarrollándose en la Universidad Tecnológica de Nanyang, en Singapur (NTU, 2024). La idea de aprovechar la glucosa corporal también está siendo explorada por empresas como Dexcom y Abbott, que desarrollan sensores subcutáneos capaces de obtener la energía necesaria para su funcionamiento directamente del organismo, reduciendo la dependencia de baterías convencionales (Rayan *et al.*, 2026).

Estas celdas tienen también un enorme potencial en dispositivos implantables. Investigadores de la Universidad Grenoble Alpes lograron implantar bioceldas en el cerebro de un grupo de ratas, donde alimentaron pequeños dispositivos electrónicos durante varios meses, demostrando que esta tecnología puede mantenerse operando durante largos periodos dentro de un organismo vivo (Cinquin *et al.*, 2010). Otra área de gran interés son los dispositivos portátiles o *wearables*. En México, investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEC) desarrollaron parches adhesivos capaces de generar electricidad a partir del sudor de la espalda para monitorear glucosa y electrolitos en deportistas (Melchor, 2024). Y, de forma similar, investigadores de la Universidad de California, San Diego, lograron producir electricidad utilizando el lactato presente en el sudor humano (Halford, 2013).

Como se mencionó en los párrafos anteriores, estos no son los únicos fluidos útiles. La orina y la saliva también han demostrado ser excelentes fuentes de energía para este tipo de dispositivos. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC) desarrolló celdas de papel desechables activadas con orina, pensadas para alimentar dispositivos de un solo uso, como pruebas de embarazo o para la detección de enfermedades como VIH, ébola y hepatitis C, en comunidades donde el acceso a la energía y las celdas no son posibles (IMB-CNM-CSIC, 2021).



Figura 3. Celda desarrollada en el CSIC. Fuente: IMB-CNM-CSIC (2021).



Por su parte, investigadores de la Universidad de Binghamton, Nueva York, diseñaron una biobatería activada por saliva capaz de producir electricidad pocos minutos después de añadir una sola gota. Además de conservarse durante cuatro meses sin degradarse, un arreglo de apenas dieciséis celdas, del tamaño aproximado de una hoja de papel, logró alimentar un LED durante veinte minutos continuos (Brhel, 2017).

A pesar de estos avances, las bioceldas de combustible todavía enfrentan importantes desafíos antes de llegar a un uso masivo. Su principal limitación es la baja densidad energética en comparación con tecnologías como las baterías de litio, limitando su uso a dispositivos de bajo consumo. Además, la potencia que generan continúa siendo reducida, normalmente del orden de micro o miliwatts, insuficiente para alimentar equipos que demandan grandes cantidades de energía. Finalmente, el uso de dispositivos que interactúan directamente con el cuerpo humano también plantea retos regulatorios y clínicos que deberán resolverse antes de su implementación generalizada (Ferrari *et al.*, 2022; Moehlenbrock y Minteer, 2008).

Sin embargo, estas limitaciones no significan que la tecnología haya fracasado. En la ingeniería, no todas las innovaciones buscan reemplazar por completo a las tecnologías existentes; algunas encuentran su valor al resolver problemas específicos donde las soluciones tradicionales no son suficientes. En el caso de las bioceldas de combustible, su importancia no está en competir contra las baterías de litio para alimentar teléfonos o vehículos eléctricos, sino en abrir la posibilidad de crear dispositivos pequeños, autónomos y capaces de integrarse directamente con los organismos vivos.

La historia demuestra que muchas de las tecnologías que hoy consideramos normales comenzaron siendo poco prácticas, costosas o

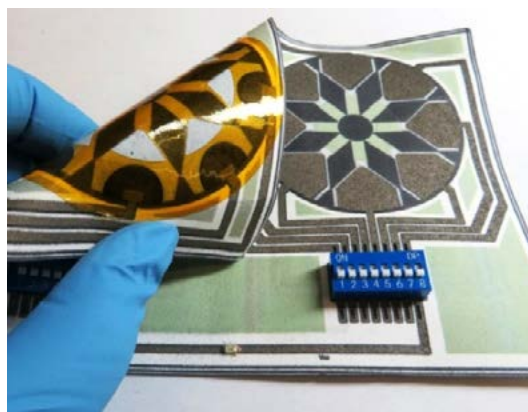


Figura 4. Celda de biocombustible a base de saliva.
Fuente: Brhel (2017).

incluso imposibles de fabricar a gran escala. Tal vez dentro de algunos años resulte completamente normal que un sensor médico, un parche inteligente o una prueba de diagnóstico obtengan la energía necesaria del mismo cuerpo que deben monitorear. Si ese futuro llega, será gracias a décadas de investigación y al esfuerzo de miles de científicos que han trabajado, tanto literal como metafóricamente, con sangre, sudor y lágrimas en su desarrollo.

Referencias

- Aiyer, K. S. (2020). How does electron transfer occur in microbial fuel cells? *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(2), 19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-020-2801-z>
- Brhel, J. (2017, 8 de agosto). New battery is activated by your spit. *BingUNews*. <https://www.binghamton.edu/news/story/709/new-battery-is-activated-by-your-spit>
- Cinquin, P., Gondran, C., Giroud, F., Mazabrard, S., Pellissier, A., Boucher, F., Alcaraz, J., Gorgy, K., Lenouvel, F., Mathé, S., Porcu, P., y Cosnier, S. (2010). A Glucose BioFuel Cell Implanted in Rats. *PLoS ONE*, 5(5), e10476. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0010476>
- Ferrari, I. V., Pasquini, L., Narducci, R., Sgreccia, E., Di Vona, M. L., y Knauth, P. (2022). A Short Overview of Biological Fuel Cells. *Membranes*, 12(4), 427. <https://www.mdpi.com/2077-0375/12/4/427>
- Halford, B. (2013, 10 de junio). Sweat power. *Chemical & Engineering News*. <https://cen.acs.org/articles/91/i23/Sweat-Power.html>
- Instituto de Microelectrónica de Barcelona [IMB-CNM-CSIC]. (2021, 21 de julio). "Hemos desarrollado



- baterías sostenibles de papel que se alimentan con líquidos como el sudor o la orina". *IMB-CNM. Noticias y Divulgación*. <https://www.imb-cnm.csic.es/es/noticias-divulgacion/noticias/hemos-desarrollado-baterias-sostenibles-de-papel-que-se-alimentan-con>
- Jiao, W., Ma, R., y Gao, Y. (2024). Research advances in electrochemical human motion energy harvesting technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 967, p. 118474. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572665724004521>
- Keane, K. (2017, 23 de agosto). Sweat-powered biofuel cells illuminate LEDs. *Architect Magazine*. https://www.architectmagazine.com/technology/sweat-powered-biofuel-cells-illuminate-leds_o/
- Kižys, K., Zinovičius, A., Jakštys, B., Bružaitė, I., Balčiūnas, E., Petrulėvičienė, M., Ramanavičius, A., y Morkvėnaitė-Vilkončienė, I. (2023). Microbial Biofuel Cells: Fundamental Principles, Development and Recent Obstacles. *Biosensors*, 13(2), 221. <https://www.mdpi.com/2079-6374/13/2/221>
- Melchor, D. (2024, 9 de diciembre). CIDETEQ Microfluidics Lab Generates Electricity from Sweat. *TecScience*. <https://tecscience.tec.mx/en/biotechnology/cideteq-electricity-sweat/>
- Minteer, S. D., Liaw, B. Y., y Cooney, M. J. (2007). Enzyme-based biofuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 228–234. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166907000389>
- Moehlenbrock, M. J., y Minteer, S. D. (2008). Extended lifetime biofuel cells. *Chemical Society Reviews*, 37(6), 1188–1196. <https://doi.org/10.1039/b708013c>
- Nanyang Technological University [NTU] (2024, 8 de julio). NTU Singapore scientists develop “band-aid” that measures glucose levels in sweat using microlaser technology. *Bioengineer News*. https://www3.ntu.edu.sg/CorpComms2/Documents/2024/07_Jul/Bioengineer_240708_smartplaster.pdf
- Otis, B. (2016, 16 de agosto). Introducing our smart contact lens project. *Google*. <https://blog.google/alphabet/introducing-our-smart-contact-lens/>
- Rayan, M. N., Reddy, N., Verma, N., y Dungan, K. (2026, 12 de abril). Monitoring technologies: Continuous glucose monitoring, mobile technology, biomarkers of glycemic control. En K. R. Feingold *et al.* (Eds.), *Endotext*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279046/>



LA SIMPLICIDAD EN LA CIENCIA: DE NEWTON A SPACEX

FRANCISCO JAVIER TREJO GARCÍA

Doctor en Ingeniería Industrial

Universidad Anáhuac México. Facultad de Ingeniería

francisco_trejo@anahuac.mx

*“Es sencillo hacer que las cosas sean complicadas,
pero difícil hacer que sean sencillas.”
Friedrich Nietzsche*

¿Por qué las ideas simples pueden producir resultados extraordinarios?

En la cultura actual existe la percepción de asociar el progreso científico con sistemas cada vez más complejos y algoritmos más sofisticados, asimismo se tiene la percepción de que el análisis de grandes cantidades de datos genera automáticamente mejores decisiones. En muchos sentidos, esta percepción es correcta: la ciencia moderna opera sobre fenómenos que requieren modelos matemáticos avanzados, instrumentos más precisos y sistemas altamente especializados. Sin embargo, existe una paradoja fundamental en la historia de la ciencia: los mayores avances no siempre han surgido de teorías complejas, sino por el contrario de marcos conceptuales más simples. Los avances científicos, en muchos casos, no consisten en acumular explicaciones, sino en reducir la complejidad aparente del mundo a unos pocos principios prácticos y accesibles.

Esta idea puede observarse con claridad si recordamos la física clásica de Isaac Newton, y hacemos una analogía con ejemplos contemporáneos de ingeniería avanzada, como el sistema de acoplamiento automático de la cápsula Dragon de SpaceX con la Estación Espacial Internacional (ISS) (Matthews *et al.*, 2020). Aunque a primera vista se trata de contextos muy distintos —uno filosófico-matemático del siglo XVII y otro tecnológico-

aeroespacial del siglo XXI—, ambos comparten una misma enseñanza: *un sistema no debe ser más complejo de lo estrictamente necesario y su funcionamiento debe explicarse de la manera más simple posible.*

La simplicidad no es superficialidad: es complejidad bien resuelta

A menudo se confunde lo simple con lo superficial. Sin embargo, en ciencia, la simplicidad representa una profunda reflexión y análisis; es el resultado de un trabajo intelectual capaz de distinguir lo esencial de lo innecesario. Newton comprendió esto de manera extraordinaria. Su famoso rechazo a “fingir hipótesis” (*hypotheses non fingo*) no debe entenderse como una renuncia a pensar, sino como un acto de disciplina metodológica: no añadir entidades o mecanismos cuando los fenómenos pueden ser explicados mediante relaciones matemáticas suficientemente sólidas, pero a la vez simples (Guicciardini, 2009). Esto, en un mundo cada vez más complejo, que requiere de la toma de decisiones más rápidas y efectivas, es mucho más valioso.

Lo *simplista* elimina matices de manera arbitraria; lo *simple*, en cambio, surge después de comprender la estructura de un problema a un nivel muy profundo. En los *Principia*, Isaac Newton buscó encontrar el menor número de principios capaces de dar cuenta del mayor número de fenómenos posible. Esa aspiración