

CAPÍTULO 1 ÁREA DE ENERGÍA

PILAS GALVÁNICAS FLEXIBLES DE Ag–Al A BASE DE TEXTILES

**Norberto Hernández-Como^{1*}, Miguel Aleman-Arce¹,
Francisco Javier Hernández-Cuevas¹, Ricardo David
Elizalde-Sandoval²**

¹ Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional, México.

² Escuela Superior de Ingeniería Textil, Instituto Politécnico Nacional, México.

nohernandezc@ipn.mx

<https://doi.org/10.3926/oms.404.3>

Hernández-Como, N., Aleman-Arce, M., Hernández-Cuevas, F.J., & Elizalde-Sandoval, R.D. (2020). Pilas galvánicas flexibles de Ag–Al a base de textiles. En E. San Martín-Martínez (Ed.). *Avances de investigación en Nanociencias, Micro y Nanotecnologías. Volumen II*. Barcelona, España: OmniaScience. 47-62.

Resumen

Los textiles inteligentes brindan diversas funcionalidades como son: acabados especiales sobre las telas (antibacteriales, antimanchas, ignífugo, hidrofóbico, etc.), sensado de diversas variables (físicas, químicas, biológicas, etc.), circuitos electrónicos de propósito específico (calefacción, antenas, almacenamiento y procesamiento de información, etc.), pantallas e iluminación, todo esto incorporado en la ropa y calzado. Las aplicaciones electrónicas normalmente se deben poder retirar de las telas antes de un ciclo de lavado para evitar un rápido deterioro. Actualmente, todo este tipo de aplicaciones utilizan fuentes de energía externas, baterías comerciales o conexión a la línea eléctrica para satisfacer sus necesidades de consumo de potencia. Por esta razón, para brindar la independencia de fuentes externas es más conveniente que los textiles inteligentes utilicen pilas o baterías igualmente integradas en los mismos textiles. En este trabajo se estudia la pila galvánica a base de electrodos de plata y aluminio utilizando telas de algodón. Se reporta su curva de descarga y se extrae la capacidad de la pila en unidades de miliampere por hora (mAh). Adicionalmente, las pilas textiles fabricadas contienen las siguientes características: son ligeras, son de área pequeña, son flexibles, su proceso de fabricación es simple y sus características eléctricas son escalables.

Palabras clave: Textiles inteligentes; Pilas textiles; Electrónica flexible; Electrodos de plata.

1. Introducción

Actualmente, una gran variedad de dispositivos electrónicos ha sido fabricados con características que los hacen flexibles y ligeros utilizando nuevos materiales o modificados. Entre estos dispositivos podemos mencionar a: las celdas solares, los transistores, los circuitos CMOS y las pantallas, todos fabricados en sustratos que agregan flexibilidad [1–4]. Los denominados textiles inteligentes permiten reproducir las características eléctricas de estos dispositivos con la intención de integrar todas sus funcionalidades en ropa y calzado, sin embargo, su desarrollo presenta diversos retos como la compatibilidad de materiales y procesos, así como desempeño y estabilidad eléctrica inferior [5]. Algunos textiles inteligentes en desarrollo son los diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés), cosechadores de energía, calefactores, transistores, sensores, antenas para identificación por radio frecuencia y baterías [6–12]. Las baterías son una parte esencial para energizar dispositivos electrónicos portátiles (teléfono celular y relojes inteligentes, computadoras, cámaras fotográficas, etc.).

Una batería es un sistema cerrado en el cual la energía es almacenada en forma química y se convierte en energía eléctrica a través de reacciones de reducción y oxidación (redox) [13]. Lo anterior causa que una corriente eléctrica fluya entre los dos contactos de la batería a través de una carga. Tradicionalmente, los aparatos electrónicos se diseñan de acuerdo a la forma de las baterías comerciales disponibles (prismáticas, cilíndricas, tipo moneda, etc.), las cuales son de gran volumen, rígidas y por supuesto no son flexibles [14]. En la cuestión de almacenamiento de energía utilizando textiles existen las baterías y también los supercapacitores los cuales se fabrican al recubrir los textiles o los hilos con materiales multifuncionales [15–17]. En este trabajo se trabaja con pilas galvánicas como elemento primario y debe recalcar su diferencia con el término batería que tiene que ver más con la interconexión de varias pilas para incrementar su corriente y voltaje. Además, una pila se considera un elemento irreversible, es decir, las reacciones electroquímicas que ocurren durante su descarga se realizan en un solo sentido hasta que la masa de uno de sus electrodos se agota. Por otro lado, las baterías son elementos reversibles que permiten la carga y descarga de corriente por varios ciclos [18]. Recientemente, se han realizado un par de estudios en cuanto a pilas galvánicas flexibles a base de electrodos de aluminio y plata, utilizando un electrólito acuoso. Aunque las pilas con electrólitos acuosos generan un voltaje del orden de 1.3 V, su fabricación es

más simple y no requieren de materiales tan complejos como aquellas basadas en electrolitos secos y de polímeros [18]. En un primer reporte, las pilas con electrodos de plata y aluminio se han fabricado utilizando papel hidrofílico para facilitar ser impregnado por los diferentes materiales que las componen, el área por pila es de alrededor de 64 mm^2 y cuando se conectan en serie y paralelo forman una batería que otorga 2.8 mA y 3.8 V [19]. Estas pilas pueden ser integradas en biosensores y ser activadas con la misma muestra biológica, lo cual es útil para crear un sistema totalmente independiente. En un segundo reporte, se utilizan telas de algodón y poliéster para el armado de pilas con un área de 36 mm^2 , alcanzando voltajes de 1.3 V y corrientes de alrededor de 25 mA [20]. En ambos reportes se utiliza agua desionizada o incluso agua de uso común para activar las pilas y la aplicación que buscan es principalmente energizar sensores biológicos portátiles. Sin embargo, a la fecha no se han reportado las curvas de descarga para este tipo de pilas y por lo tanto se desconoce cuál es su capacidad para poder diseñar apropiadamente esos sensores o cualquier aplicación que se busque satisfacer. Por lo tanto, en este trabajo se desarrollaron pilas galvánicas de Ag–Al en telas de algodón y se estudió el efecto del tipo de líquido de activación, el volumen de activación de dicho líquido, el área de la pila y las conexiones serie y paralelo, en todos los casos se obtuvieron las curvas de descarga para obtener y reportar la capacidad de las pilas. Finalmente, se estudiaron las modificaciones necesarias para hacer flexibles las pilas textiles y se demostró su aplicación en la alimentación de un diodo emisor de luz.

2. Metodología

Las pilas textiles fueron fabricadas utilizando tramos de tela de 100 % algodón de 42mm x 6mm. Se preparan las soluciones de AgNO_3 , AlCl_3 y NaNO_3 (polvos marca Fermont) a concentraciones de 6M, 2M y 6M, respectivamente. Las concentraciones molares se determinaron a partir de experimentos previos y de lo reportado en [20]. Las telas se sumergen en cada solución durante 1 minuto y después se dejan secar a temperatura ambiente ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 24 h. La tela impregnada con AlCl_3 se le agrega un secado adicional a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 30min para remover el exceso de humedad. Láminas metálicas de 1mm de espesor y pureza de 99.99 % para Ag (ánodo) y 99.999 % para Al (cátodo) son cortadas en tramos de 48 mm x 6 mm. Los contactos metálicos se lijan, se limpian con diluyente de pinturas (thinner) y se lavan secuencialmente con agua desionizada, acetona, agua desionizada, alcohol isopropílico, agua desionizada y secado con nitrógeno.

Finalmente, las pilas textiles son ensambladas colocando primero el contacto de plata y encima las telas impregnadas en el siguiente orden: AgNO_3 , NaNO_3 y AlCl_3 , y hasta arriba el contacto de aluminio. Todos los componentes de la pila se sujetan con tiras de cinta *masking*. Las dimensiones de las telas y de los contactos fueron elegidas para que el ensamble fuera más simple y estable, y además poder tener dos terminales de 6mm x 6mm para realizar conexiones eléctricas con caimanes. El proceso de fabricación se muestra en la Figura 1. Las pilas deben activarse agregando agua desionizada, esto para realizar las mediciones eléctricas de las pilas. La activación se realiza con una jeringa de 0.3ml utilizando volúmenes de 80, 160 y 240 μL , y se procura no mojar los contactos solo las telas. Para mejorar la generación de energía eléctrica, se realizaron pruebas al mojar las pilas con diferentes concentraciones de ácido nítrico: 0.5, 1, 2, 3 y 4M. También se realizaron pilas de diferente área (tamaño de las telas) de largo de: 6, 21, 42 y 84 mm, con un ancho de 6 mm para todos los casos. Las curvas de descarga fueron realizadas programando un equipo Keithley 2450.

Para realizar las pilas textiles flexibles, se utilizan contactos de aluminio con un espesor de 200 μm y una pureza de 99.99 % y tramos de tela de algodón se recubren con pintura de plata (EMS #12686-15). Las telas con pintura de plata se secan a 80 °C durante 30 min. El ensamblaje de las pilas y las mediciones eléctricas son similares a las primeras pilas. El área de las telas de estas pilas fue de 42 mm x 6 mm. En las pilas textiles flexibles se estudiaron las conexiones serie y paralelo utilizando dos pilas similares en cada caso. Para la conexión en serie se demostró su aplicación mantener encendido un LED rojo por un determinado tiempo.

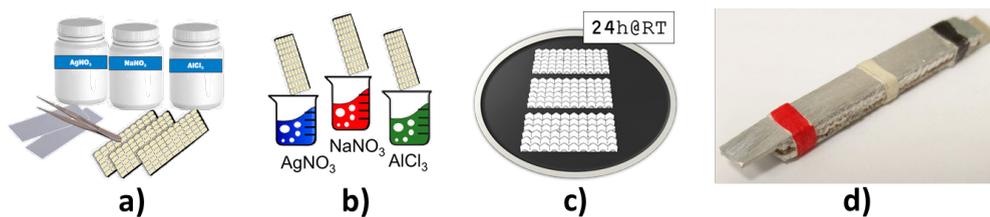


Figura 1. Proceso de fabricación de las pilas textiles:
a) materiales, b) impregnación, c) secado y d) ensamble.

Como se mencionó anteriormente, existe una reacción electroquímica en cuanto las pilas son activadas con el agua desionizada y se tiene conectada una carga en sus terminales. Las denominadas semirreacciones químicas que suceden en los electrodos de la pila son las siguientes [20]:



Estas semirreacciones son producidas de manera más específica como se describe a continuación. La tela impregnada con AgNO_3 contiene una disolución de iones Ag^+ . Los átomos del ánodo de Ag pierden electrones a través de la semirreacción de oxidación (Ec. 1), estos electrones se mueven a través del circuito externo y pasan por la carga hasta llegar al electrodo de aluminio. Los iones de Ag^+ son liberados hacia la disolución de AgNO_3 , con lo cual se reduce la masa del contacto metálico de Ag. Por otro lado, la tela impregnada de AlCl_3 contiene una disolución de iones Al^{3+} . En el cátodo de Al sucederá la semirreacción de reducción (Ec. 1) por cada tres electrones que llegan al cátodo de Al. Lo anterior producirá un incremento de la masa del contacto metálico de Al. El puente salino, tela impregnada con NaNO_3 , mantiene las dos disoluciones estables eléctricamente y evita que entren en contacto. Para esto, el puente salino aporta iones NO_3^- hacia la tela de AgNO_3 para neutralizar la solución por el incremento de iones Ag^+ , y iones de Na^+ hacia la tela de AlCl_3 para compensar la pérdida de iones Al^{3+} . Para apreciar mejor estas reacciones se realizó la Figura 2 que equivale a lo que sucede cuando las pilas son activadas con agua desionizada, esto de acuerdo al funcionamiento de la pila de Daniell a base de electrodos de cobre y zinc [21].

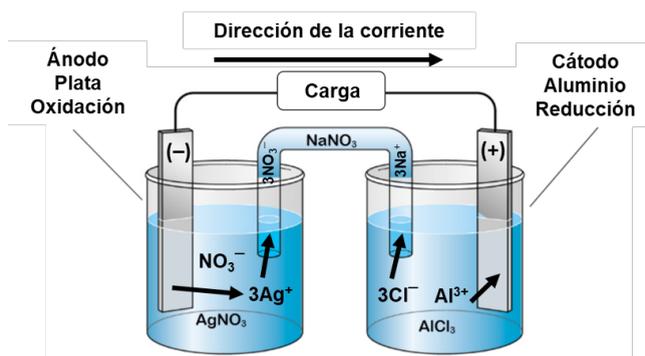


Figura 2. Diagrama equivalente de la pila textil.

3. Resultados

Antes de ensamblar las pilas, se realizó una caracterización por difracción de rayos-X a las telas impregnadas con las tres diferentes soluciones después de

su respectivo secado. Estos resultados se muestran en la Figura 3. En todos los espectros aparecen los picos relacionados con la celulosa, componente principal del algodón. En la Figura 3a, se observa correspondencia con los picos de la ficha del NaNO_3 , indicando que este material se está alojando adecuadamente entre las fibras del algodón sin distorsionar su estructura cristalina. En la Figura 3b, se observa una fuerte intensidad de los picos correspondientes al AgNO_3 , los picos de la celulosa son prácticamente opacados indicando que el AgNO_3 recubre con una capa gruesa a las fibras de algodón. Finalmente, en la Figura 3c, se observa un espectro amorfo para el material AlCl_3 , con ligera presencia de los picos de la celulosa, lo anterior es debido a la alta absorción de humedad que tiene el AlCl_3 . La presencia de los materiales en cada tramo de las telas es fundamental para asegurar el funcionamiento de la pila.

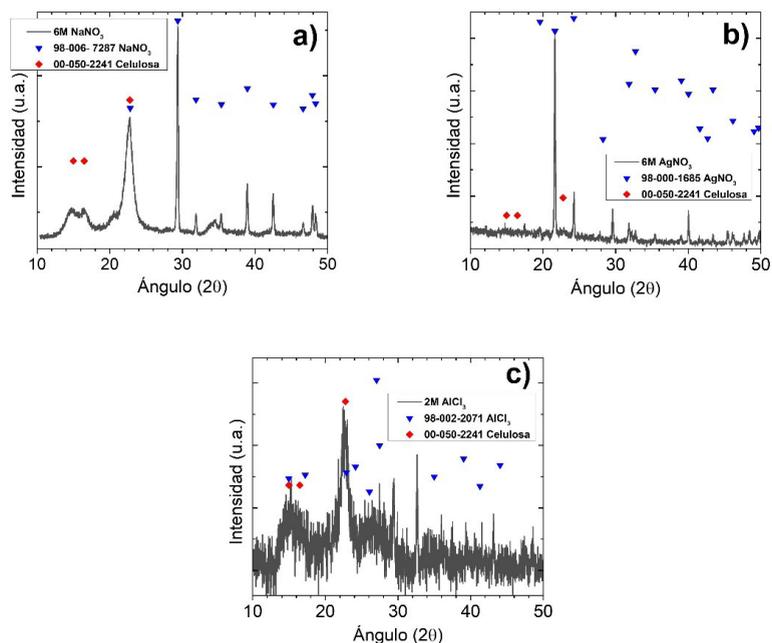


Figura 3. Espectros de difracción de rayos-x.

Posteriormente, a las pilas textiles se les mide su curva de descarga, lo que se logra al programar el equipo Keithley 2450 para que actúe como una carga que demanda 1 mA de corriente constante. La configuración utilizada para la medición es dada por el fabricante del equipo y se muestra en la Figura 4 [22]. Las terminales HI y LOW del equipo de medición corresponden a las terminales positiva y negativa

de la pila, respectivamente. Durante un ciclo de descarga el voltaje de la pila (V_B) debe ser mayor al voltaje del equipo de medición (V_S). Este estudio se realiza en función del tiempo y se detiene solo cuando el voltaje de la batería se ha reducido hasta el voltaje V_S o cuando corriente de la pila disminuye a menos de 1mA. En los estudios realizados se programó un voltaje V_S igual a 0.9 V. La corriente de descarga de 1mA se eligió para que las pilas puedan alimentar circuitos electrónicos con una demanda media de corriente, por ejemplo, circuitos programables y hasta *displays* de bajo consumo (LEDs, *displays* de 8 dígitos y LCDs pequeños).

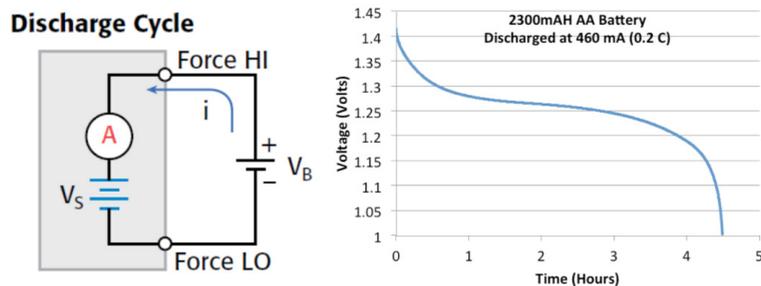


Figura 4. Diagrama del circuito de descarga y ejemplo de una curva de descarga de una pila utilizando el equipo Keithley 2450 (Keithley, 2014).

La capacidad de una pila o batería se mide en miliamperes por hora (mAh). Por ejemplo, si una pila tiene una capacidad de 100 mAh y se utiliza para otorgar 5mA de corriente promedio a una carga, en teoría, la vida útil de la pila sería de 20 horas. De esta manera, de la curva de descarga de cada pila podemos obtener su capacidad experimental al multiplicar la corriente de descarga (1 mA) por las horas que logró mantener esta corriente. Cabe mencionar que la capacidad obtenida a través de la curva de descarga es normalmente inferior al valor teórico, lo cual tiene que ver con las condiciones ambientales de almacenamiento (humedad, temperatura, presión) y por fugas propias de la pila debido a su construcción y empaque entre otros varios factores [23]. Un ejemplo de una curva de descarga se muestra en la Figura 4.

Las primeras pilas fueron caracterizadas a diferente volumen de activación, esto es 80, 160 y 240 μ L. La Figura 5a muestra la corriente generada por cada pila, es claro que a mayor volumen de activación mayor la corriente generada, aunque también es claro que al pasar una hora esta corriente es fuertemente reducida a un valor menor a los 20 mA para todos los casos. Las curvas de descarga se muestran

en la Figura 5b, en esta figura se observa como un volumen de agua de 240 uL es realmente perjudicial tal que la pila es drenada completamente en menos de 1hr. Por otro lado, un volumen de 80 uL y de 160 uL otorgan un tiempo máximo de 1.5 y 3 h, respectivamente. Por lo tanto, el volumen óptimo para las características de nuestra pila textil es de 160 uL dando una capacidad de hasta 2.75 mAh. Por medio de las dos gráficas de la Figura 5 se puede observar la importancia de la curva de descarga para poder evaluar de mejor manera las características de las pilas. Aunque anteriormente se han reportado pilas fabricadas con materiales similares, esta es la primera vez que se reporta su curva de descarga [19.20].

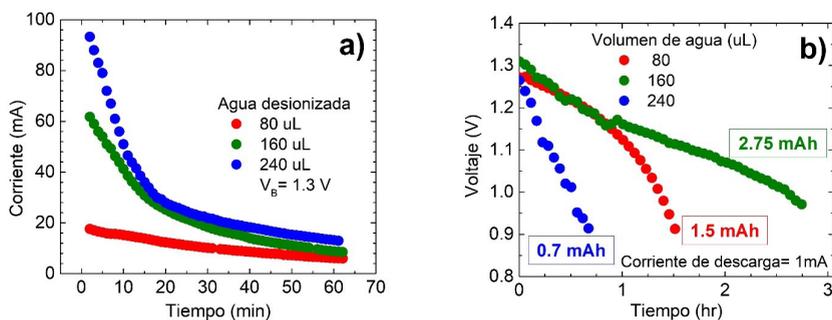


Figura 5. a) Corriente vs. Tiempo y b) curvas de descarga para las pilas textiles en función del volumen de agua desionizada para su activación.

Como se explicó anteriormente el NaNO_3 es responsable de evitar que se mezclen las disoluciones del AgNO_3 y AlCl_3 a través de aportar aniones y cationes para neutralizar los iones Ag^+ y Cl^- . Este proceso se puede volver mucho más eficiente si el líquido que activa las tres telas impregnadas es capaz de aportar más aniones y cationes, lo cual se logra al incorporar ácido nítrico (HNO_3) diluido en agua, aportando iones H^+ y NO_3^- . Adicionalmente, la incorporación de ácido nítrico ayuda a reducir la corrosión presente en los contactos metálicos. La Figura 6a muestra las pilas activadas con diferentes concentraciones molares de HNO_3 , y a comparación de la Figura 5 se observa una mayor capacidad incluso con la menor concentración molar de 0.5M. Esto demuestra la efectividad del HNO_3 para mejorar la capacidad de la pila con base en la mejora del proceso electroquímico (reacciones redox) que toma lugar en cada electrodo. La máxima capacidad de 9.2mAh se observa a una concentración molar de 4M de HNO_3 . Aunque es posible seguir incrementando la concentración de HNO_3 para mejorar la capacidad, eso haría poco seguro su manejo dado que el empaque de la pila no es a prueba de fugas del líquido de activación.

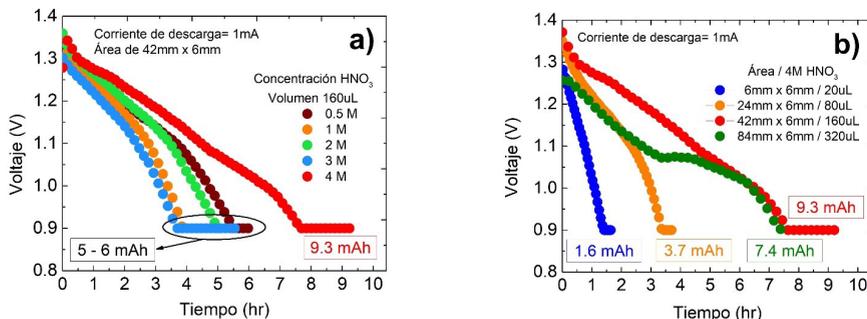


Figura 6. Curva de descarga en función de:

a) diferentes concentraciones de ácido nítrico y b) diferente áreas.

La capacidad de las pilas también fue evaluada en función de su área. Para tal fin se fabricaron pilas con cuatro áreas diferentes y su volumen de activación se escaló de acuerdo con el factor de incremento o decremento del área. Estos resultados se muestran en la Figura 6b. Podemos observar que el área de 42 mm x 6 mm es la que otorga la mayor capacidad de hasta 9.3 mAh. El área más grande, de 84 mm x 6 mm, es la única pila que no sigue la tendencia de incremento, lo cual puede ser debido a que esa pila tiene más fugas debido al empaque y sobre todo porque para ese tamaño la forma rectangular ya no es tan estable. Cabe recalcar que no existe restricción en la forma de las baterías, y en un futuro puede desarrollarse una forma geométrica más adecuada para mantener un compromiso entre buen funcionamiento y facilidad de ensamblar las pilas.

Con las pruebas realizadas hasta este momento para fabricar una pila se considera como óptimo un área de 42 mm x 6 mm y utilizar 160 uL de una solución de 4M de HNO₃ para su activación. Con estos resultados se planteó el diseño de una pila textil que además fuera flexible, para lo cual lo principalmente necesario era eliminar la rigidez de los contactos metálicos de Ag y Al. Para tal fin, se utilizó pintura de plata sobre un tramo de tela y un contacto de aluminio más delgado para que brindará la flexibilidad buscada. La curva de descarga de esta pila se muestra en la Figura 7 alcanzado una capacidad de hasta 5 mAh, casi dos veces mayor que su contraparte de 2.75 mAh de la Figura 5b activada con agua desionizada, pero casi la mitad de 9.3 mAh que es la capacidad de la pila rígida activada con 4M de HNO₃ de la Figura 6a. El decremento de la capacidad con respecto a su contraparte rígida es debido a fugas por el empaque y a la diferencia en la calidad y propiedades de los contactos de plata y aluminio.

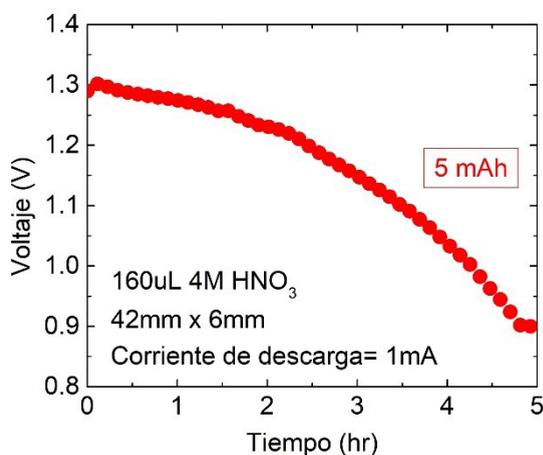


Figura 7. Curva de descarga para la pila textil flexible.

Con el fin de incrementar el voltaje y la corriente de las pilas textiles flexibles se optó por utilizar conexiones serie y paralelo. Primero, la conexión en serie se realizó utilizando dos pilas similares, Figura 8a, y se obtuvo el doble del voltaje de hasta 2.6 V y que la capacidad de 4.7 mAh es muy similar a la obtenida en la Figura 7. Lo anterior es consistente con la conexión en serie, donde se espera que el voltaje sea la suma de las pilas conectadas y la corriente sea la misma como si una sola pila estuviera conectada. Por otro lado, la conexión en paralelo también se realizó utilizando dos pilas, Figura 8b, y en este caso el voltaje se queda en 1.3V y la corriente debe duplicarse, lo cual lo vemos con un incremento en la capacidad de hasta 8.8 mAh. Con estos dos tipos de conexiones se pudo observar que es posible realizar este tipo de conexiones a semejanza de pilas comerciales. Finalmente, se realizó la configuración mostrada en la Figura 8c donde se duplica el voltaje y se obtiene un incremento de 1.5 veces la corriente, alcanzando una capacidad de 7.3 mAh. Nuevamente, la reducción en la capacidad se debe al incremento de las fugas asociadas al ensamble y al empaque de las pilas. Cabe mencionar que en este trabajo no se presentan resultados de las pilas flexibles bajo efectos de estrés mecánico como puede ser el doblamiento de las pilas durante su operación. La configuración que utiliza 2 pilas en serie se utilizó para alimentar un LED rojo, el cual necesita un voltaje mínimo de 1.6 V, y que al menos fue posible mantenerlo prendido durante 5 horas con una corriente medida con un multímetro de 4mA al inicio y hasta 1 mA al final de la medición. Para esta medición no se utilizó ningún limitante de corriente, como una resistencia, por

lo que la demanda de corriente por parte del LED no era constante. La Figura 8d muestra una foto de las baterías en conexión serie y el LED rojo encendido. Los resultados obtenidos demuestran que las baterías textiles flexibles pueden cumplir con requerimientos por demás adecuados para alimentar cargas como pueden ser sensores y circuitos programables. Aún queda a futuro desarrollar el contacto de aluminio de una manera similar al contacto de plata utilizando un tramo de tela de algodón.

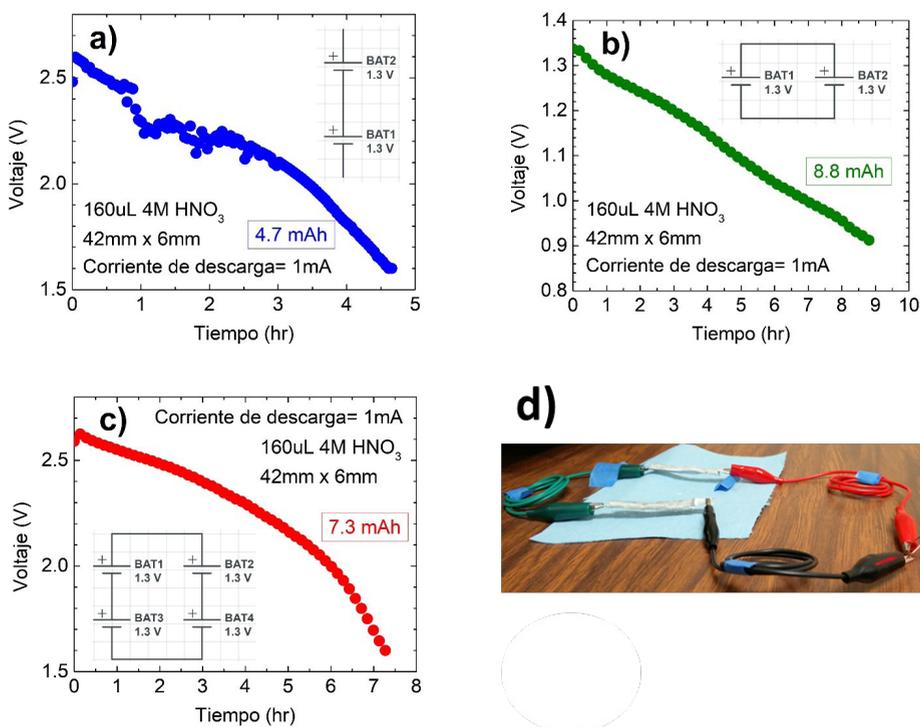


Figura 8. Conexiones de pilas textiles flexibles:

a) serie, b) paralelo, c) serie y paralelo, y d) aplicación en la alimentación de un LED.

4. Conclusiones

Se realizaron pilas galvánicas utilizando telas de algodón y contactos de plata y aluminio. El voltaje de las pilas es de 1.3V y su corriente está determinada por la concentración molar de las soluciones de AgNO_3 , AlCl_3 , NaNO_3 y el líquido de activación ya sea agua desionizada o ácido nítrico diluido. Las capacidades obtenidas estuvieron en el rango de los 5 a 10 mAh bajo diferentes esquemas de fabricación de las pilas (en función del volumen de activación, área, líquido de

activación). Además, se demostró que las pilas pueden tener cierta flexibilidad si los contactos metálicos son sustituidos ya sea por impregnación de las telas con tintas conductoras o con el uso de contactos metálicos delgados. Los resultados cuando se realizan conexiones serie y paralelo permiten escalar el voltaje y la corriente para energizar cargas con mayor demanda de corriente. Las pilas desarrrolladas en esta investigación pueden tener aplicación en diversos dispositivos de monitoreo de la salud o de circuito electrónicos que requieran una fuente de energía que sea de capacidad media, ligera y tenga flexibilidad mecánica para adaptarse a superficies no planas, esto en dirección de aplicaciones de la denominada electrónica flexible.

Bibliografía

1. Hashemi, S.A., Ramakrishna, S., & Aberle, A.G. (2020). Recent progress in flexible-wearable solar cells for self-powered electronic devices. *Energy Environ. Sci.*, 13, 685-743. <https://doi.org/10.1039/c9ee03046h>.
2. Park, J.W., Kang, B.H., & Kim, H.J. (2020). A Review of Low-Temperature Solution-Processed Metal Oxide Thin-Film Transistors for Flexible Electronics. *Adv. Funct. Mater.*, 30, 1-40. <https://doi.org/10.1002/adfm.201904632>.
3. Chung, S., & Lee, T. (2020). Towards flexible CMOS circuits. *Nat. Nanotechnol.*, 15, 11-12. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0596-6>.
4. Zhu, H., Shin, E.S., Liu, A., Ji, D., Xu, Y., & Noh, Y.Y. (2020). Printable Semiconductors for Backplane TFTs of Flexible OLED Displays. *Adv. Funct. Mater.*, 30, 1-36. <https://doi.org/10.1002/adfm.201904588>.
5. Chen, G., Li, Y., Bick, M., & Chen, J. (2020). Smart Textiles for Electricity Generation. *Chem. Rev.*, 120, 3668-3720. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00821>.
6. Zhang, Z., Guo, K., Li, Y., Li, X., Guan, G., Li, H. et al. (2015). A colour-tunable, weavable fibre-shaped polymer light-emitting electrochemical cell. *Nat. Photonics*, 1-31. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.37>.
7. Nilsson, E., Mateu, L., Spies, P., & Hagström, B. (2014). Energy harvesting from piezoelectric textile fibers. *Procedia Eng.*, 87, 1569-1572. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.600>.

8. Li, Y., Zhang, Z., Li, X., Zhang, J., Lou, H., Shi, X. et al. (2017). A smart, stretchable resistive heater textile. *J. Mater. Chem. C.*, 5, 41-46. <https://doi.org/10.1039/C6TC04399B>.
9. Oweyung, R.E., Terse-Thakoor, T., Rezaei Nejad, H., Panzer, M.J., & Sonkusale, S.R. (2019). Highly Flexible Transistor Threads for All-Thread Based Integrated Circuits and Multiplexed Diagnostics. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 31096-31104. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b09522>.
10. He, W., Wang, C., Wang, H., Jian, J., Lu, W., Liang, X. et al. (2019). Integrated textile sensor patch for real-time and multiplex sweat analysis. *Sci. Adv.*, 5, 1-9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0649>.
11. Alonso-Gonzalez, L., Ver-Hoeye, S., Vazquez-Antuna, C., Fernandez-Garcia, M., & Andres, F.L.-H. (2019). Multifunctional Fully Textile-Integrated RFID Tag to Revolutionize the Internet of Things in Clothing [Wireless Corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 61, 104-110. <https://doi.org/10.1109/MAP.2019.2907910>.
12. Qian, G., Liao, X., Zhu, Y., Pan, F., Chen, X., & Yang, Y. (2019). Designing Flexible Lithium-Ion Batteries by Structural Engineering. *ACS Energy Lett.*, 4, 690-701. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b02496>.
13. Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 359-367. <https://doi.org/10.1038/35104644>.
14. Reddy, T. (2010). *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed.
15. Qu, H., Semenikhin, O., & Skorobogatiy, M. (2015). Flexible fiber batteries for applications in smart textiles. *Smart Mater. Struct.*, 24. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/2/025012>.
16. Zhai, S., Karahan, H.E., Wei, L., Qian, Q., Harris, A.T., Minett, A.I. et al. (2016). Textile energy storage: Structural design concepts, material selection and future perspectives. *Energy Storage Mater.*, 3, 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.02.003>.
17. Lee, Y.H., Kim, J.S., Noh, J., Lee, I., Kim, H.J., Choi, S. et al. (2013). Wearable textile battery rechargeable by solar energy. *Nano Lett.*, 13, 5753-5761. <https://doi.org/10.1021/nl403860k>.

18. Gaikwad, A.M., Arias, A.C., & Steingart, D.A. (2014). Recent Progress on Printed Flexible Batteries: Mechanical Challenges, Printing Technologies, and Future Prospects. *Energy Technol.*, 3, 305-328. <https://doi.org/10.1002/ente.201402182>.
19. Thom, N.K., Yeung, K., Pillion, M.B., & Phillips, S.T. (2012). “Fluidic batteries” as low-cost sources of power in paper-based microfluidic devices. *Lab Chip.*, 12, 1768. <https://doi.org/10.1039/c2lc40126f>.
20. Liu, X., & Lillehoj, P.B. (2015). A liquid-activated textile battery for wearable biosensors. *J. Phys. Conf. Ser.* 660, 1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/660/1/012063>.
21. Dong, X., Wang, Y., & Xia, Y. (2014). Re-building Daniell cell with a Li-ion exchange film. *Sci. Rep.*, 4, 1-6. <https://doi.org/10.1038/srep06916>.
22. Keithley (2014). Rechargeable Battery Charge/Discharge (Galvanic) Cycling Using the Keithley Model 2450 or Model 2460 SourceMeter SMU Instrument. http://download.tek.com/document/2450_2460_Recharge_Battery_AppNote.pdf.
23. Farahani, S. (2008). Chapter 6 - Battery Life Analysis. En S.B.T.-Z.W.N., T. Farahani (Ed.). *Newnes, Burlington*, 207–224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8393-7.00006-6>